



České vysoké učení technické
v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství



Úloha KA03/č. 5:

**Měření kinematiky a dynamiky pohybu osoby v
prostoru pomocí ultrazvukového radaru**

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

5. Měření kinematiky a dynamiky pohybu osoby v prostoru pomocí ultrazvukového radaru

Úkol měření a výpočtu

- Určete translační rychlosti a zrychlení vybraného segmentu těla, a těla jako celku, ultrazvukovým systémem.
- Určete kinetickou energii pro různé rychlosti pohybu těla
- Určete přibližným výpočtem fyzickou zátěž při chůzi za předpokladu změřených kinematických veličin

Teoretický základ řešených úloh

Sledovací zařízení bývá stacionární a jeho části jsou instalovány ve známých pozicích scény. Sledovacích systémů, které nám poskytují informaci o poloze sledovaného objektu v oboru biomechaniky, je celá řada, asi nejčastěji jsou používány kamerové systémy, elektromagnetické systémy či ultrazvukové systémy. Systémy se tedy liší podle technologie snímání a záznamu dat. Pro snímání pohybujících se objektů je možné použít nejjednodušších kamer, jako jsou např. webkamery, či dražší Motion Capture (MoCap) systémy, které nám přímo vyhodnotí pohyb v 3D prostoru pomocí více než jen jednoho sledovacího senzoru. Sledovací systémy rozdělujeme na „pasivní“ a „aktivní“ podle způsobu detekce markerů (také tzv. značek) umístěných na požadovaných anatomických bodech těla. Markery se musí umísťovat v souladu s metodikou doporučenou výrobcem systému nebo zavedenými standardy, z důvodu přesné detekce vzájemného pohybu segmentů těla, a následné možnosti srovnání výsledků mezi různými pracovišti. Zavedené standardy popisují rozmístění markerů, tzv. sety markerů, kterým jsou přiřazeny příslušné 3D modely svalově-kosterních systémů těla.



Obr.1: Příklady ultrazvukových senzorů polohy, (převzato z podkladů firmy CMA).

Všechny výše uvedené MoCap systémy nám vždy, s větší či menší přesností, poskytují informaci o poloze vybraných objektů či bodů v prostoru vzhledem k poloze k systému nebo soustavě systémů. Jako příklad uvažujme sledování pohybu těla, s kterým se například ve sportovní biomechanice.

Význam hybnosti objektu a působících sil

Z Druhého Newtonova zákona, tzv. Zákona síly víme: „Jestliže na těleso působí síla, pak se těleso pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa.“. Obecněji bývá zákon síly vyjadřován tak, že síla \vec{F} je rovna časové změně hybnosti \vec{p} , což lze matematicky vyjádřit jako

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} \quad (1)$$

Původní atomistické představy předpokládaly, že nejmenší částice hmoty, z nichž se skládají tělesa, jsou dále nedělitelné a jejich vlastnosti se nemění. Tento předpoklad lze při makroskopických pohybech obvykle považovat za platný, což nám dovoluje přejít k původní formulaci zákona síly:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}, \quad (2)$$

kde \vec{F} je síla, m je hmotnost tělesa, \vec{a} je zrychlení. Pokud si uvědomíme, že zrychlení je derivace rychlosti neboli druhá derivace polohy, lze zákon síly použít k sestavení pohybové rovnice

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2}, \quad (3)$$

kteřá umožňuje řešit konkrétní pohybové děje (určovat polohu a rychlost těles v závislosti na čase), jsou-li známy konkrétní síly působící při dějích a hmotnosti těles. Takováto úloha dynamiky se nazývá „přímá úloha“, neboť jsou známy silové účinky a vyšetřuje se pohyb dynamické soustavy. Opakem přímé úlohy je „inverzní úloha“, neboť je znám pohyb soustavy (zjištěný např. MoCap systémy) a vyšetřují se silové účinky a reakce s okolím.

Měření rychlosti a zrychlení v prostoru

Pokud předpokládáme pohyb tělesa přímočarý, tzn. trajektorií pohybu je přímka, pak tento pohyb můžeme rozdělit na rovnoměrný přímočarý a nerovnoměrný přímočarý pohyb. Rovnoměrný přímočarý pohyb je pohyb po přímce se stálou rychlostí. Pokud přímočarý pohyb není rovnoměrný, označuje se jako nerovnoměrný přímočarý pohyb, což je pohyb s proměnnou rychlostí. Dráha rovnoměrného přímočarého pohybu je určena vztahem

$$s = v \cdot t + s_0, \quad (4)$$

kde v je rychlost, t je čas, s_0 je počáteční dráha (dráha v čase $t = 0$), je-li $s_0 = 0$, pak

$$s = v \cdot t \quad (5)$$

Pro rychlost rovnoměrného přímočarého pohybu ($v = \text{konst.}$) píšeme

$$v = \frac{s - s_0}{t}, \quad (6)$$

zrychlení rovnoměrného přímočarého pohybu je $a = 0$. Podle Newtonova zákona víme, že na těleso, které se pohybuje rovnoměrně přímočaře, nepůsobí žádná síla.

Nyní předpokládejme pohyb tělesa rovnoměrně zrychleným přímočarým pohybem, u kterého směr i velikost zrychlení zůstává konstantní, trajektorií je přímka nebo část přímky a velikost rychlosti se mění přímo úměrně s časem. Směr rychlosti se nemění. Jestliže je zrychlení kladné, pak se rychlost zvyšuje a jedná se o zrychlený pohyb, jestliže je zrychlení záporné, pak se rychlost snižuje a jedná se o pohyb zpomalený.

Pro rovnoměrně zrychlený pohyb, kdy rychlost roste lineárně, určíme průměrnou rychlost

$$v_p = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{v_0 + (v_0 + a \cdot t)}{2} = v_0 + \frac{a \cdot t}{2}, \quad (7)$$

kteřá je aritmetickým průměrem okamžitých rychlostí na začátku a na konci uvažované dráhy. Překonaná dráha je tedy určena vztahem

$$s = s_0 + v_p \cdot t = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2, \quad (8)$$

kde a je zrychlení, v_0 je počáteční rychlost (rychlost v čase $t = 0$), s_0 je počáteční dráha (dráha v čase $t = 0$), t je čas.

Předpokládejme, že frekvence snímání polohy bodu v prostoru daným sledovacím systémem nám definuje časový krok Δt . Real-time výpočet rychlosti a zrychlení ze znalosti překonané dráhy, která je dána rozdílem souřadnic polohy v konkrétním směru ve dvou různých časových okamžicích záznamu, je prováděn například jednoduše metodou zpětné numerické derivace

$$v_x = \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (9)$$

$$a_x = \frac{v_{x,i} - v_{x,i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}, \quad (10)$$

kde a je okamžité zrychlení, v je rychlost, t je čas, i značí aktuální hodnotu, $i-1$ je předchozí zaznamenaná hodnota. V případě, že jsou časové body ekvidistantní, pak lze například tři body proložit parabolou a odvodit aproximaci derivace pro offline analýzu záznamu:

$$v_x = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2 \cdot \Delta t}, \quad (11)$$

pro stejné tři body lze také odvodit vzorec pro odhad druhé derivace

$$a_x = \frac{x_{i+1} - 2 \cdot x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2}. \quad (12)$$

Identickým způsobem by se určovala rychlost a zrychlení pro zbývající směr y , a pro 3D úlohu i směr z .

Určení emetické energie při pohybu

Za zjednodušujících předpokladů lze psát:

$$E_c = E_k \Rightarrow E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_f^2, \quad (13)$$

kde m je hmotnost konkrétní části tělesa resp. těla jako celku, a v_f je dosažená rychlost pohybu.

Určení fyzické zátěže při chůzi

V oblasti ergonomie práce se setkáváme s výpočtem fyzické zátěže. Existuje celá řada metod výpočtů, přičemž se vždy vychází z hmotnosti břemen, s kterými je manipulováno, či z hmotností segmentů těla, resp. hmotnosti celého těla, dle konkrétní řešené úlohy. Předpokládejme, že fyzická práce bývá obecně složena ze dvou částí

$$W^F = W^D + W^S, \quad (14)$$

kde W^D je dynamická práce (chůze, manipulace s břemenem, atp.) a W^S je statická práce (extrémní poloha těla a jeho částí, tlak, stisk, atp.). Konkrétním příkladem výpočtu může být určování dynamické práce při chůzi po rovině experimentálně určeným vztahem:

$$W_{CH}^D = m_T \cdot g \cdot 0,03 \cdot V_T \cdot k_N \cdot \frac{l_C}{l_K} \cdot \frac{1}{\eta}, \quad (15)$$

kde m_T je hmotnost těla v kg; \bar{g} je gravitační zrychlení; V_T výška těla v m; k_N je koeficient negativní práce (1,33=4/3); l_C je celková délka chůze v m; l_K je délka kroku v m daná rychlostí chůze a η je účinnost těla při chůzi (0,2 až 0,3). V případě chůze s překonáváním výšky je experimentální vztah upraven:

$$W_{CHv}^D = W_{CH}^D + W_v^D = W_{CH}^D + m_T \cdot g \cdot l_v \cdot k_N \cdot \frac{1}{\eta}, \quad (16)$$

kde W_v^D je práce na překonání výšek; l_v je celková překonaná výška chůzí v m; $k_N = 1,33$ za předpokladu překonání výšek, tj. vždy nahoru a následně dolů. Pokud se jedná pouze o chůzi do kopce je $k_N = 1$, pokud z kopce je $k_N = 0,33$.

Pro další případy fyzické zátěže vztahy vychází z obdobných předpokladů, jak bylo na příkladu uvedeno, pro výpočty jsou sestrojeny podrobné tabulky.