

## Chůze z pohledu fyziky

*Zdeněk Bochníček, Přírodovědecká fakulta MU v Brně*

V průběhu evoluce se vyvinulo jen velmi málo způsobů pozemního pohybu suchozemských živočichů. Z nich nejefektivnější je bezesporu chůze a běh, pohyb využívající opory končetin. Podívejme se na pro nás nejběžnější pohyb, lidskou chůzi, z hlediska mechaniky.

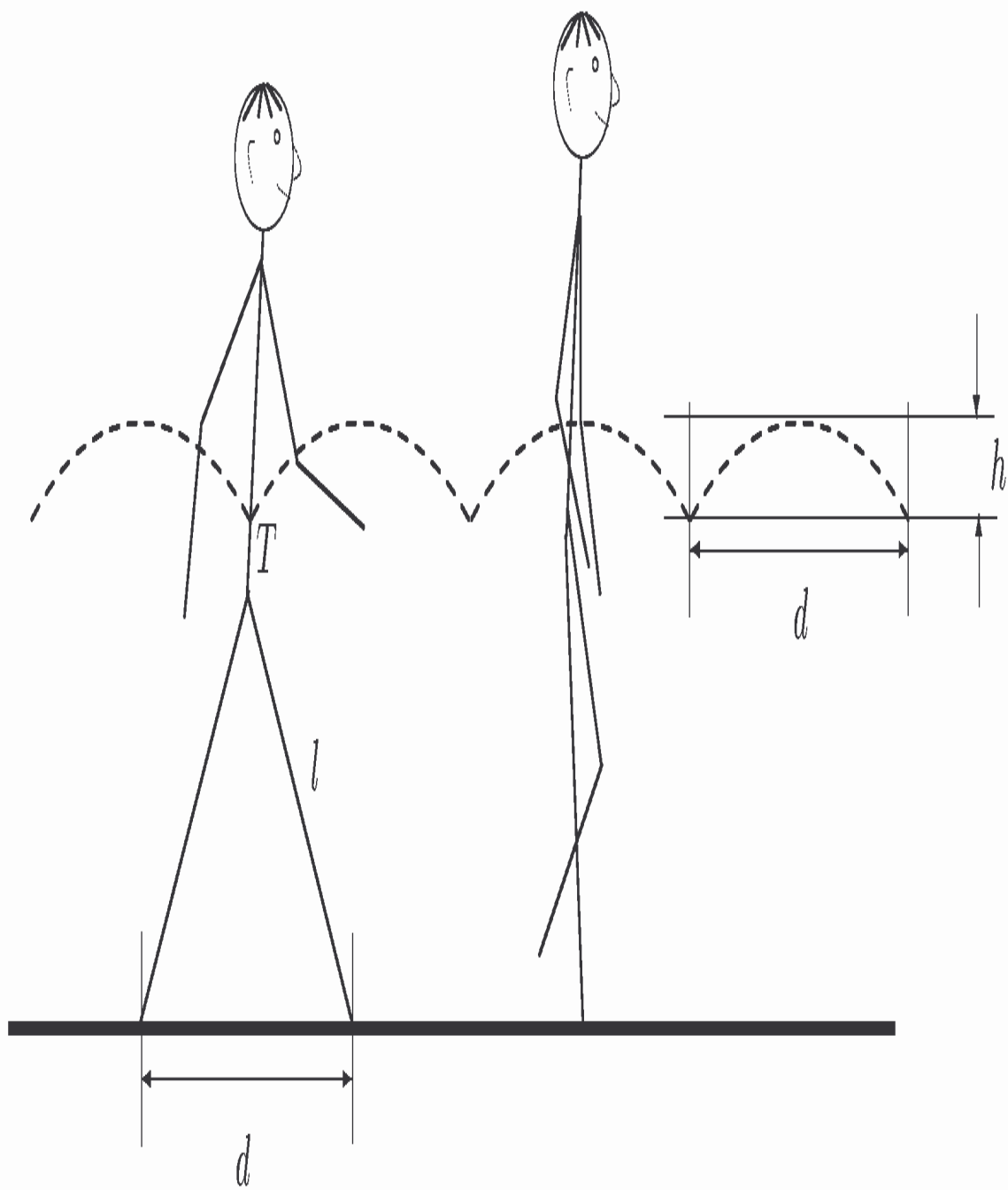
Chůze se liší od běhu tím, že v každém okamžiku je alespoň jedna noha ve styku s podložkou. Předpokládejme, že na začátku kroku je pravá noha vzadu a levá vpředu. Krok začíná tak, že se pravá noha odrazí od země a mírně ohnutá překmitne dopředu. Tělo přitom vykoná oblouk na napjaté levé noze. Tím se pravá noha dostane dopředu a levá dozadu. Tento pohyb opakuje střídavě s pravou a levou nohou. V dalším textu budeme periodou chůze rozumět dobu trvání dvou po sobě následujících kroků.

### **Mechanická práce při chůzi**

Vodorovný pohyb tělesa v homogenním tíhovém poli je ve fyzice základní i střední školy typický příklad pohybu, při kterém se nekoná žádná práce. Člověk však subjektivně hodnotí množství vykonané práce pocitem únavy, a proto například přenášení tašky po třídě nemůže přesvědčivě demonstrovat takovýto pohyb. A přitom pomocí velmi jednoduché úvahy můžeme ukázat nutnost výdeje mechanické energie při chůzi, a to i bez uvážení všudypřítomných odporových sil.

Pozice A

Pozice B

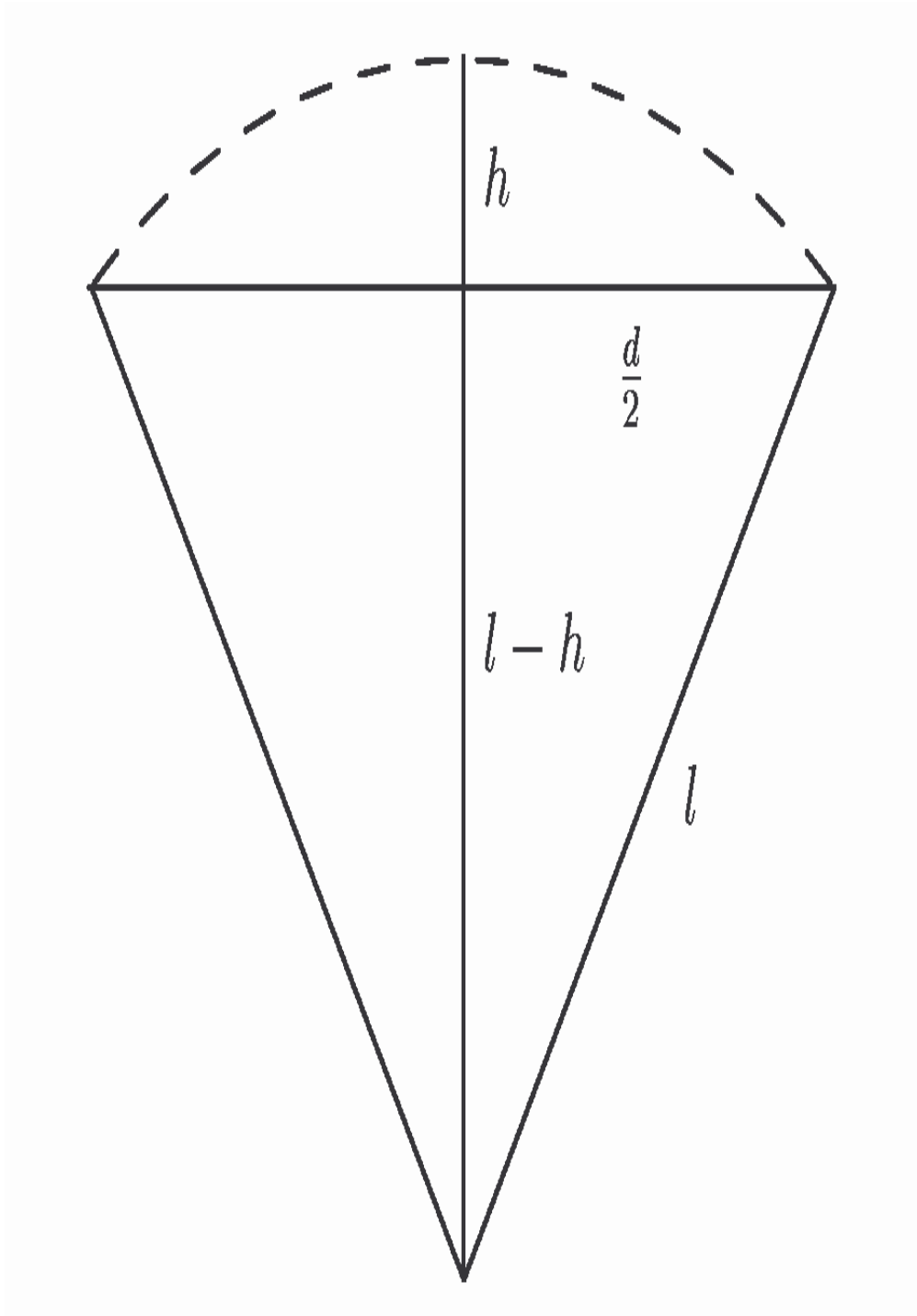


### obrázek 1

Rozhodující pro odhad mechanické práce konané při chůzi je pohyb těžiště těla, jehož trajektorie je schematicky znázorněna na obr. 1. Těžiště se pohybuje přibližně po obloukové křivce a energie nutná k udržení tohoto pohybu je dána prací potřebnou ke zvýšení polohy těžiště o převýšení  $h$ . V každém kroku tedy musíme tedy dodat energii  $mgh$ , kterou při následném poklesu těžiště těla již nezískáme zpět. Z jednoduché geometrie (viz obr. 2) přímo plyne:

$$h = l - \sqrt{l^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2},$$

kde význam symbolů je zřejmý z obrázku.



obrázek 2

Dosadíme-li typické hodnoty  $l = 0,95\text{m}$ ,  $d = 0,80\text{m}$  dostaneme  $h = 0,1\text{m}$ , což je asi desetina délky kroku. Tzv. biomechanická zásada uvádí, že při chůzi po vodorovné rovině musíme vykonat asi  $1/15$  mechanické práce, nutné pro zvednutí těla ve svislém směru o tutéž vzdálenost. Náš jednoduchý odhad poskytl poněkud vyšší hodnotu. Ve skutečnosti je totiž pohyb těžiště komplikovanější než naznačuje obr. 1 a veličina  $h$  je skutečně menší. Při chůzi se koordinovaně pohybuje celé tělo což efektivně vyhlazuje trajektorii těžiště a navíc rozkládá mechanický výkon na více svalových skupin. K tomu přispívá především:

1) **Ohýbání chodidla v kotníku.** Odrážíme se špičkou nohy, což prodlužuje efektivní délku nohy v závěrečné fázi kroku a tím krok prodlužuje.

2) **Natáčení pánve.** Pánev natáčíme vždy vzhůru na straně opěrné nohy, natočení je maximální v pozici B z obr. 1. Tímto snížíme maximální výšku těžiště těla, a tak zmenšíme hodnotu převýšení  $h$ . Při závodní chůzi značné vytáčení pánve minimalizuje zvlnění trajektorie těžiště a s ním související výdej energie.

3) **Pohyb končetin.** Vykročení doprovázené pohybem rukou posouvá těžiště těla vzhůru vzhledem k trupu. Takto v pozici A zvýšíme minimální výšku těžiště a opět zmenšíme  $h$ .

S využitím biomechanické zásady je již jednoduché odhadnout průměrný výkon při chůzi jako 1/15 výkonu nutného ke svislému stoupání rychlostí chůze. Tedy:

$$P = \frac{1}{15} Fv = \frac{1}{15} mgv = \frac{1}{15} \cdot 80 \cdot 10 \cdot 1,1 \div 60 \text{ W},$$

kde počítáme s rychlostí chůze  $v = 4 \text{ km/h}$  tedy asi  $1,1 \text{ m/s}$ .

V následující tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty **mechanického** výkonu při různém pohybu a pro srovnání také **tepelný** výkon člověka v klidu.

činnost člověka	výkon
chůze	60W
běh maraton	300W
běh 1500m	500W
běh 100m	1200W
tepelný výkon v klidu	80W

Zajímavé je porovnat chůzi se sprintem na 100m. Při desetkrát pomalejší chůzi vydáváme dvacetkrát nižší výkon. Chůze je tedy přibližně dvakrát efektivnější než rychlý běh.

Vertikální pohyb těžiště, a tedy i očí, si běžně při chůzi ani neuvědomíme. Zřetelný se stane např. půjdeme-li vedle jiného chodce tak, že mezi našimi kroky bude fázový posuv  $\pi/2$ . Zkuste odhadnout hodnotu převýšení  $h$  vašeho kroku. Na zrcadlo přilepte folii s narýsovanými vodorovnými linkami vzájemně vzdálenými například o 2 cm. Umístěte zrcadlo svisle, přibližně do výše očí. Kráčejte směrem k zrcadlu a pozorujte přes tuto folii odraz vašich očí. Ze vzájemného zdánlivého pohybu odrazu očí a orientačních linek se snadno přesvědčíte o vertikálním pohybu vašich očí a při troše pozornosti i odhadnete velikost  $h$ .

## Rychlost chůze

Z pohledu mechaniky je překmitnutí nohy vpřed kyvem fyzického kyvadla otočně upevněného v kyčelním kloubu. Chůze bude nejpohodlnější a nejméně únavná, pokud frekvence kroků bude blízká frekvenci vlastních kmitů nohy. Pro odhad této frekvence předpokládejme, že kyv nohy je harmonický pohyb, pro jehož periodu platí:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mga}},$$

kde:  $J$  - moment setrvačnosti nohy vzhledem k ose otáčení  
 $a$  - vzdálenost těžiště nohy od osy otáčení.

Moment setrvačnosti nohy a polohu těžiště vzhledem k ose otáčení můžeme odhadnout jen přibližně. Pro výpočet momentu setrvačnosti předpokládejme, že noha je homogenní tyč. Její zúžení v dolní části je alespoň částečně kompenzováno chodidlem, které tvoří dodatečný přívažek ve velké vzdálenosti od osy otáčení. Těžiště nohy je přibližně ve 40% procentech její délky. Za těchto předpokladů pro periodu vlastních (netlumených) kmitů dostaneme:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}ml^2 + m(\frac{l}{2})^2}{mga}} = 2\pi \sqrt{\frac{l^2}{3ga}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,95^2}{3 \cdot 10 \cdot 0,4 \cdot 0,95}} \div 1,8 \text{ s.}$$

K výpočtu momentu setrvačnosti  $J$  jsme použili Steinerovu větu. Při průměrné délce kroku 0,8 m by byla rychlost chůze 3,2 km/h, což je hodnota blízká skutečné rychlosti pomalé a pohodlné chůze. Chceme-li chůzi zrychlit, musíme silou svých svalů urychlit překmitnutí nohy, což vyžaduje úsilí, které je neúměrné přírůstku rychlosti. Zdvojnásobení rychlosti chůze vyžaduje více než dvojnásobný svalový výkon.

## Proč při chůzi máváme rukama?

Mávání rukama, jak již bylo zmíněno dříve, zvyšuje polohu těžiště v okamžiku maximálního vykročení a tak snižuje skutečnou hodnotu převýšení  $h$  se ziskem snížení výdaje energie. Obě horní končetiny tvoří asi 10% hmotnosti těla a jejich vychýlením o  $30^\circ$  dosáhneme zvýšení těžiště přibližně o 5% dříve spočtené hodnoty  $h$ . Ve skutečnosti i pohyb rukou vyžaduje práci svalů, při mávání rukama však zapojujeme do činnosti jiné svalové skupiny a tak pomáháme odlehčit svalům nohou.

Malé vyhlazení trajektorie těžiště není jediným důvodem pohybu rukou. Mávání rukama a případně i natáčení horní části trupu kompenzuje moment hybnosti nohou vzhledem ke svislé ose těla. S kmitavým pohybem nohou při chůzi souvisí oscilující moment hybnosti, který, pokud by tělo bylo izolovanou soustavou, by musel být kompenzován rotačním pohybem celého trupu případně pohybem rukou v protifázi s pohybem nohou. Naše tělo samozřejmě není při chůzi izolovanou soustavou, a tak můžeme kráčet zcela strnule bez jakéhokoliv rotačního pohybu trupu či rukou. Trup je pak udržován v klidu třecí silou mezi chodidly a podložkou a s ní spojeným momentem síly. Moment třecí síly však torzně namáhá naše dolní končetiny a činí takovouto chůzi velmi nepohodlnou.

## Mechanická práce a únava

Lidské tělo, stejně jako těla jiných živočichů, je složitým systémem a nelze proto na něj bezrozmyslně aplikovat výsledky jednoduchých mechanických úvah. Jen dva příklady pro ilustraci:

a) **Napjatá pružina nekoná práci ale napjatý sval se unaví.** Aby se konala mechanická práce, je nutný posun tělesa za současného působení síly. Napjatá a fixovaná pružina nekoná žádnou mechanickou práci, ale pouhé stání člověka na místě je únavné. Z hlediska výdeje mechanické energie je lhostejné, zda stojíme na napjatých nohách, nebo v podřepu. Je však výhodnější využívat pevné opory kostry než držet tíhovou sílu těla napjatými svaly. Chůze z kopce unavuje i když těžiště těla trvale klesá.

b) **Sval pracuje hospodárněji, podává-li menší výkon.** Při malém výkonu probíhá ve svalu současně i regenerace svalové hmoty, takže člověk je schopen vykonat více práce nízkým výkonem za dlouhou dobu než velkým úsilím koncentrovaným do krátkého času. Například při dlouhém stoupání je výhodnější pomalé vytrvalé tempo než rychlý výstup s častými přestávkami.

## Proč člověk nemá kola?

Valení kola je velmi efektivní způsob pohybu. Malé valivé tření a schopnost přeměnit akumulovanou potenciální energii v kinetickou (jízda z kopce) jsou nesporné výhody pohybu na kolech, takže kolo se stalo naprosto dominantním způsobem pozemní dopravy technické civilizace. Přesto je přírodě kolo neznámé. Důvody, proč evoluce nevytvořila kolo jsou velmi pádné:

a) Efektivní pohyb na kolech je možný jen po dostatečně rovné podložce a ve volné členité přírodě je zcela nevhodný.

b) Technické řešení je velmi obtížné, není tedy divu, že nebylo přírodou zvládnuto. Jak bychom například vyřešili osu otáčení, přívod cév a nervů do rotující části, jaké svalové skupiny by kolo poháněly a jak?

## Opravdu člověk nemá kola?

Odpověď na tuto, na první pohled absurdní otázku, nemusí být jednoznačná, porovnáme-li mechaniku chůze s valením kola:

valení kola	chůze
Těžiště zůstává v konstatní výšce	Pohyb těžiště je jen mírně zvlněn
Styčná plocha je vůči podložce v klidu	Styčná plocha je vůči podložce v klidu

Pokud přirovnáme energetickou spotřebu při chůzi se smýkáním tělesa po podložce, zjistíme, že chůze je ekvivalentní smýkání dvou ploch s koeficientem tření  $f = 0,07$ , což je hodnota nižší než například tření mezi dvěma ocelovými povrchy ( $f = 0,1$ ),. Naše končetiny nám tedy umožňují nejen energeticky málo náročnou chůzi i v obtížném terénu, ale také přelézat ploty, lézt po stromech i plavat.

### Literatura:

M. Štaigler, L. Červinka: Aplikace technické mechaniky pro učitele, SPN Praha 1971.