

Cyklus chodenia

Majme robota s trupom a nohami. Každá noha pozostáva zo stehna, predkolenia, nohy. Majú 6 stupňov voľnosti. Tri v bedrovom kĺbe, jedna v kolene a dva v členku. Chodenie pozostáva z dvoch fáz. Buď sú obidve nohy na zemi alebo iba jedna, ktorá slúži ako opora. Počas fázy keď sú obidve nohy na zemi sa postupne prenáša ťažisko zo zadnej nohy na prednú nohu. Ak je táto fáza pomalá, je náročné vytvoriť rýchlu chôdzu. Treba vedieť stanoviť správny čas na túto fázu.

Keď trajektórie pohybu bedrových kĺbov a nôh sú známe, vieme odvodiť uhly kĺbov pomocou kinematických obmedzení. Robot sa pohybuje rovno, polohy chodidiel bývajú konstante. Chôdza bude pozorovaná z boku.

Trajektória nohy popísaná $X_a = [x_a(t), z_a(t), \Theta_a(t)]^T$ kde $(x_a(t), z_a(t))$ sú súradnice členku a $\Theta_a(t)$ je uhol členku. Trajektória kĺbu popísaná vektorom $X_h = [x_h(t), z_h(t), \Theta_h(t)]^T$ kde $(x_h(t), z_h(t))$ sú súradnice bedrového kĺbu a $\Theta_h(t)$ je uhol bedrového kĺbu (Fig. 1).

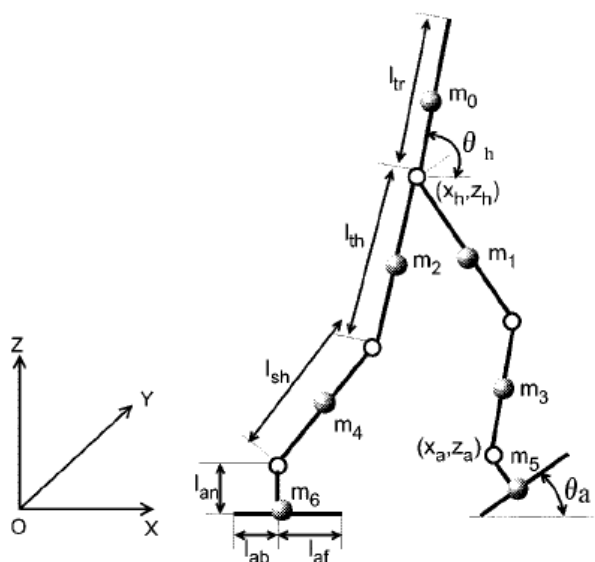


Fig. 1. Model of the biped robot.

Trajektória nôh

Časová perióda pre jeden cyklus chodenia je T_c . Je to čas jednej periódy cyklu chodenia z kT_c do $(k+1)T_c$. Kde $k=1,2,\dots,K$, K je počet krokov. Na začiatku periódy sa päta pravej nohy dotýka zeme a odchádza, vtedy je v čase kT_c a perióda končí opäť keď sa pravá noha blíži k zemi a dotýka sa jej v čase $(k+1)T_c$, (Fig.2).

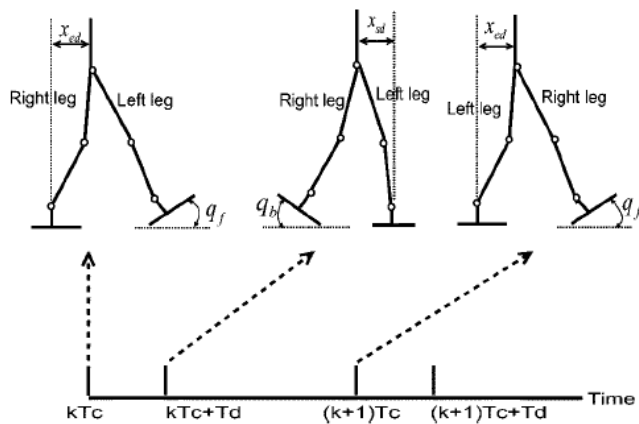


Fig. 2. Walking cycle.

Ďalej je popísané generovanie trajektórie pre pravú nohu. Trajektória ľavej nohy je rovnaká okrem trvania T_c .

Chôdza, pri ktorej sa robot dotýka celou nohou zeme hneď pri prvom kontakte nie je vhodná pre rýchlu chôdzu. Nech q_b a q_f sú uhly pravej nohy prichádzajúcej a odchádzajúcej na/zo zeme (fig. 2). Predpokladajme, že pravá noha sa celá dotýka zeme v čase $t=kT_c$ a $t=(k+1)T_c + T_d$. Z toho dostávame

$$\theta_a(t) = \begin{cases} q_{gs}(k), & t = kT_c \\ q_b, & t = kT_c + T_d \\ -q_f, & t = (k+1)T_c \\ -q_{ge}(k), & t = (k+1)T_c + T_d \end{cases} \quad (1)$$

- T_d je interval s oboma nohami na zemi
- $q_{gs}(k)$ a $q_{ge}(k)$ sú uhly medzi plochou a nohami

Na nerovnom teréne s prekážkami očakávame aby robot vedel prekážky prekonať. Nech (L_{a0}, H_{a0}) je pozícia kde sa noha vo vzduchu nachádza najvyššie (fig.3).

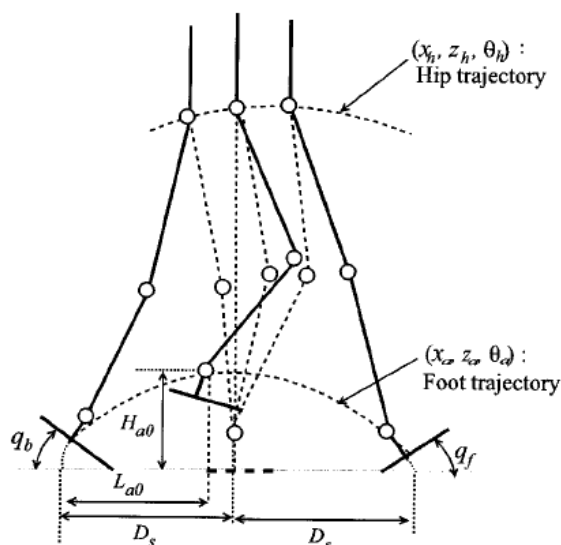


Fig. 3. Walking parameters.

$$x_a(t) = \begin{cases} kD_s, & t = kT_c \\ kD_s + l_{an} \sin q_b + l_{af}(1 - \cos q_b), & t = kT_c + T_d \\ kD_s + L_{ao}, & t = kT_c + T_m \\ (k+2)D_s - l_{an} \sin q_f - l_{ab}(1 - \cos q_f), & t = (k+1)T_c \\ (k+2)D_s, & t = (k+1)T_c + T_d \end{cases} \quad (2)$$

$$z_a(t) = \begin{cases} h_{gs}(k) + l_{an}, & t = kT_c \\ h_{gs}(k) + l_{af} \sin q_b + l_{an} \cos q_b, & t = kT_c + T_d \\ H_{ao}, & t = kT_c + T_m \\ h_{ge}(k) + l_{ab} \sin q_f + l_{an} \cos q_f, & t = (k+1)T_c \\ h_{ge}(k) + l_{an}, & t = (k+1)T_c + T_d \end{cases} \quad (3)$$

- D_s je dĺžka kroku
- $kT_c + T_m$ je čas kedy je noha v najvyššej pozícii
- l_{an} je výška nohy k členku (fig. 1)
- l_{af} je dĺžka z členku k prstom na nohách (fig. 1)
- l_{ab} je dĺžka z členku k päte (fig. 1)
- $h_{gs}(k)$ a $h_{ge}(k)$ sú dĺžky povrchu, na ktorých stojí noha

Keď celý povrch pravej nohy je na zemi v čase $t=kT_c$ a $t=(k+1)T_c + T_d$ tak platia nasledujúce obmedzenia:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_a(kT_c) = 0 \\ \dot{\theta}_a((k+1)T_c + T_d) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_a(kT_c) = 0 \\ \dot{x}_a((k+1)T_c + T_d) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_a(kT_c) = 0 \\ \dot{z}_a((k+1)T_c + T_d) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Na generovanie hladkej trajektórie je potrebné aby

- prvá derivácia (rýchlosť) $x_a(t)$, $z_a(t)$ a $\Theta_a(t)$ boli diferencovateľné
- druhá derivácia (zrýchlenie) $x_a(t)$, $z_a(t)$ a $\Theta_a(t)$ boli spojité na t , vrátane takých t , ktoré sú rovné kT_c , $kT_c + kT_d$, $kT_c + T_m$, $(k+1)T_c$, $(k+1)T_c + T_d$

Splniť obmedzenia (1) až (6) bude príliš drahé a výpočet pomocou polynomiálnej interpolácie je zložitý. Trajektóriu nôh získame z 3rd-order spline interpolácie. Druhé derivácie potom vždy budú spojité. Nastavením $q_{gs}(k)$, $g_{ge}(k)$, $h_{gs}(k)$, $h_{ge}(k)$, q_b , q_f , H_{ao} , L_{ao} sa dajú vytvoriť rôzne trajektórie nôh.

Trajektória bedrového kĺbu

Ak nie je žiadny driekový kĺb je žiadateľné aby $\Theta_h(t)$ bol konštantný. $\Theta_h(t)=0.5 \Pi$ rad. Pohyb $z_h(t)$ ovplyvňuje ZMP (zero moment point). Predpokladajme, že kĺb je v najvyššej pozícii $H_{h \max}$ v strede fázy kedy je jedna noha na zemi a v najnižšej pozícii $H_{h \min}$ vo fáze s dvoma nohami na zemi. Potom

$$z_h(t) = \begin{cases} H_{h \min}, & t = kT_c + 0.5T_d \\ H_{h \max}, & t = kT_c + 0.5(T_c - T_d) \\ H_{h \min}, & t = (k+1)T_c + 0.5T_d. \end{cases} \quad (7)$$

Trajektória $z_h(t)$ splňujúca (7) a spojitosť po druhej derivácii sa získa z 3rd-order spline interpolácie.

Zmena $x_h(t)$ je hlavný faktor ovplyvňujúci stabilitu dvojnohého robota. Existujú metódy na odvodenie trajektórie bedrového kĺbu na vykonanie ZMP. Nie všetky trajektórie sú dosiahnuteľné a akcelerácia kĺbu musí byť veľká. Na vyriešenie konfliktov boli navrhnuté opatrenia

- generovanie série hladkých pohybov $x_h(t)$
- stanoviť hranicu $x_h(t)$

Proces chodenia pozostáva z troch fáz.

- Štartovacia fáza, v ktorej rýchlosť sa mení z 0 na želanú konštantnú rýchlosť.
- Ustálená fáza s želanou konštantnou rýchlosťou
- Koncová fáza, v ktorej rýchlosť sa mení z konštantnej rýchlosti na 0.

$X_h(t)$ ustálenej fázy je získaná z procedúry. $X_h(t)$ sa dá vyjadriť dvoma spôsobmi. Počas fázy s jednou nohou na zemi a fáza s dvoma nohami na zemi. x_{sd} a x_{ed} značia vzdialenosti k osi x z bedrového kĺbu k členku opornej nohy (fig.2).

$$x_h(t) = \begin{cases} kD_s + x_{ed}, & t = kT_c \\ (k+1)D_s - x_{sd}, & t = kT_c + T_d \\ (k+1)D_s + x_{ed}, & t = (k+1)T_c. \end{cases} \quad (8)$$

Na získanie hladkého pohybu $x_h(t)$ v ustálenej fáze musia platiť obmedzenia s deriváciami.

$$\begin{cases} \dot{x}_h(kT_c) = \dot{x}_h(kT_c + T_c) \\ \ddot{x}_h(kT_c) = \ddot{x}_h(kT_c + T_c). \end{cases} \quad (9)$$

$$x_h(t) = \begin{cases} kD_s + \frac{D_s - x_{ed} - x_{sd}}{T_d^2(T_c - T_d)} [(T_d + kT_c - t)^3 - (t - kT_c)^3] - T_d^2(T_d + kT_c - t) + T_d^2(t - kT_c) + \frac{x_{ed}}{T_d}(T_d + kT_c - t) + \frac{D_s - x_{sd}}{T_d}(t - kT_c), & t \in (kT_c, kT_c + T_d) \\ kD_s + \frac{D_s - x_{ed} - x_{sd}}{T_d(T_c - T_d)^2} [(t - kT_c - T_d)^3 - (T_c + kT_c - t)^3 - (T_c - T_d)^2(T_c + kT_c - t) - (T_c - T_d)^2(t - kT_c - T_d)] + \frac{D_s - x_{sd}}{T_c - T_d}(T_c + kT_c - t) + \frac{D_s + x_{ed}}{T_c - T_d}(t - kT_c - T_d), & t \in (kT_c + T_d, kT_c + T_c). \end{cases} \quad (10)$$

Pomocou 3rd order periodic spline interpolácie získame $x_h(t)$ splňajúce (8), (9) a podmienku spojitosti druhej derivácie danej (10). Určením rôznych x_{sd} a x_{ed} dostávame rôzne plynulé trajektórie $x_h(t)$ podľa (10).

$$\begin{cases} 0.0 < x_{sd} < 0.5D_s \\ 0.0 < x_{ed} < 0.5D_s. \end{cases} \quad (11)$$

Na základe (10), (11), (13), (14) je odvodená hranica stability

$$\max_{x_{sd} \in (0, 0.5D_s), x_{ed} \in (0, 0.5D_s)} d_{zmp}(x_{sd}, x_{ed}) \quad (12)$$

$d_{zmp}(x_{sd}, x_{ed})$ určujú hranice stability. Sú iba dva parametre takže ľahko získame riešenie (12) pomocou vyčerpávajúceho hľadania(fig.4).

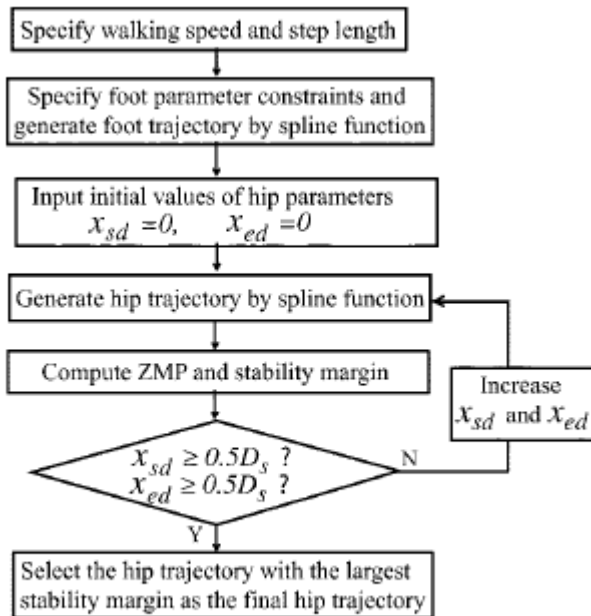


Fig. 4. Algorithm for planning walking patterns.

Určením $x_h(t)$ v ustálenej fáze sa špecifikujú koncové obmedzenia pre štartovaciu fázu a počiatočné obmedzenia pre koncovú fázu. Počiatočné obmedzenie pre štartovaciu fázu je aby derivácie $x_h(t_0)=0$ a koncové obmedzenia pre finálnu fázu $x_h(t_c)=0$. $X_h(t)$ štartovacej a koncovej fázy sa dajú získať 3rd order spline interpoláciou.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i\ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy}\ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{z}_i + g)} \quad (13)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i\ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix}\ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{z}_i + g)} \quad (14)$$

http://staff.aist.go.jp/k.kaneko/publications/2001_publications/6.pdf