

MOJAMOSIOS KOJOS PADĖTIES IR ŠUOLIO Į TOLĮ REZULTATŲ RYŠIO ANALIZĖ

Ginas Čižauskas^{1,2}, Sigita Marija Zdanavičienė¹, Kęstutis Pilkauskas², Albinas Palionis², Adelė Tamošiūnaitė², Kazimieras Pukėnas¹

Lietuvos kūno kultūros akademija¹, Kauno technologijos universitetas², Kaunas, Lietuva

Ginas Čižauskas. Technologinių mokslų daktaras. Lietuvos kūno kultūros akademijos Sporto biomechanikos, informatikos ir inžinerijos katedros asistentas. Mokslinių tyrimų kryptis — mechanikos inžinerija, biomechanika, sporto inžinerija.

SANTRAUKA

Straipsnyje nagrinėjama, koks mojamąsios kojos padėties ir šuolio į tolį rezultatų ryšys. Šuolio į tolį rezultatą lemia įsibėgėjimo greitis, atsispyrimo galia, judesių tobulumas skriejant oru ir nušokimas. Atlikta daug šuolio technikos tobulinimo mokslinių tyrimų, tačiau labai mažai dėmesio skiriama mojamąsios kojos padėčiai atsispiriant tirti.

Tokio tyrimo metu naudojant dešimties segmentų modelį, rezultatai iš dalies sutampa su eksperimentiniais, kartu jiems ir prieštarauja. Nagrinėti judesį šiuo modeliu yra sudėtinga. Dėl šios priežasties, taip pat ir dėl tikslo ribotumo analizuojama tik mojamąsios kojos įtaka — buvo sudarytas trijų masių modelis. Juo įvertinamas kojos judrumas per pėdos sąnari. Tuo tikslu sudaromas strypinis trijų masių modelis, kuriuo įvertinamas pėdos sąnario judrumas, sudaroma kinetinio ir varomojo sukimo momentų lygtys. Pateiktasis modelis, keičiant įėjimo ir valdomuosius dydžius, suteikia galimybę tyrinėti atsispyrimo procesą nepriklausomai nuo to, ar šuoliai tuo metu gali būti atliekami, ar ne. Yra nustatoma pagrindinių šuolio elementų (smūgio atsispyrimo metu, pėdos tiesimo per sąnari ir mojamąsios kojos) padėties ryšys. Mojamąsios kojos dinaminiai rodikliai išreiškiami dinamogramomis. Tokių priklausomybių negalima išvesti iš filmuoto vaizdo. Nustačius kūno korpuso svyravimų dažnį, skaičiuojamos atskirų masės centrų koordinatės, jų pirmosios išvestinės, randamos bendrojo masės centro koordinatės, nustatomas teorinis šuolio tolį priklausomumas nuo kampinių pagreičių, kuriuos valdo sportininkas. Taip sudaroma kinetinio momento lygtis, kurios pirmoji laiko išvestinė rodo ieškomą varomąjį sukimo momentą. Šiuo būdu gali būti nustatomas ir rodiklių įvairavimas, o norint kuo toliau nušokti ir įvertinti šuolio atlikimo nuoseklumą būtina tiksliai nustatyti veikimo kryptį. Pirmiausia nustatomi šuolio tolį lemiantys sukimo impulsai. Tada — realiai pasiekta momentinė sąnario jėga.

Iš modeliavimo rezultatų galima padaryti išvadą: būtina šiuos įverčius objektyvizuoti. Iki šiol (neatlikus siūlomo modeliavimo) nebuvo galima nustatyti, kaip šuolio į tolį rezultatus veikia nedideli pėdos sąnario kampo pokyčiai.

Raktažodžiai: mojamoji koja, šuolis į tolį, modeliavimas.

IVADAS

Šuolio į tolį rungtyje siekiama nušokti kuo didesnį atstumą. Į paveiksle pavaizduota, kaip kito rekordinių šuolių rezultatai pasaulio čempionatuose. Krenta į akis tas faktas, kad vyrų pasaulio rekordai per pastaruosius 25—30 metų skiriasi vos vienu kitu centimetru. Atrodytų, kad pasiekta riba. Visgi treneriai ir mokslininkai ieško būdų, kaip šiuos rezultatus pagerinti.

Šuolio į tolį rezultatą lemia įsibėgėjimo greitis, atsispyrimo galia, judesių tobulumas skriejant oru ir nušokimas. Yra daug atlikta šuolių technikos mokslinių tyrimų. Tarp jų per mažai skiriama dėmesio mojamąsios kojos padėčiai atsispyrimo metu. Atsispyrimas šuolio į tolį metu yra sudėtingas procesas. Jį sudaro smūginis atsispiriamosios kojos pastatymas, tamprioji deformacija, sukimosi

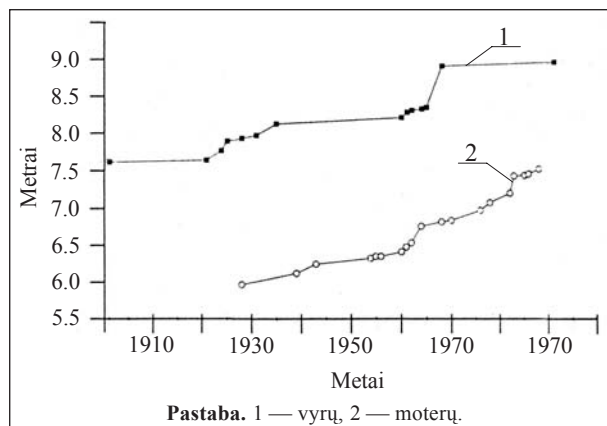
ašies perkėlimas, atskirų kūno dalių kinetinės energijos persiskirstymas dėl aktyvių ir pasyvių mojamiosios kojos judesių ir kt.

Literatūroje galima aptikti daugybę empirinių duomenų apie šuolio į tolį techniką, tačiau jie neleidžia atskleisti ryšio tarp poveikių dydžių ir rezultato. Todėl nenuostabu, kad daugelis autorių, tyrinėdami šuolio į tolį techniką, atsispirimo procesą modeliavo matematiškai.

Išsamiausias šuolio tyrimo modelis yra plokščiasis dešimties segmentų modelis. Jo sprendimas perša tris metodiškai įdomias išvadas (Александр, 1970; Hauger, Schnell, 1993; Jian Liu et al., 2003):

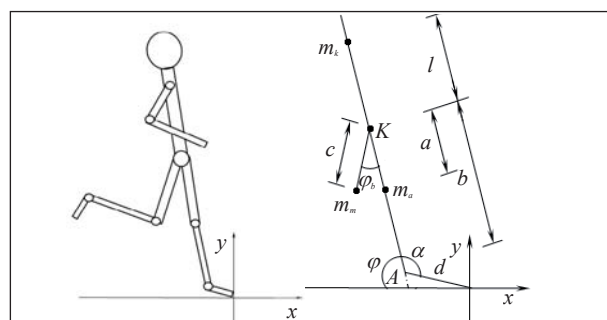
1. Iš visų kūno dalių svarbiausias šuolio metu pėdos sąnarys;
2. Atsispirimo momentu liemuo turi sukurti varomąjį sukimo momentą;
3. Atsispirimo momentu mojamoji koja turi būti kiek galima labiau ištiesta.

Tyrimo metu naudojant dešimties segmentų modelį, rezultatai iš dalies sutapo su eksperimentiniais, iš dalies jiems prieštaravo. Taip pat būtina pažymėti, kad judesio nagrinėjimas šiuo modeliu



Pastaba. 1 — vyrų, 2 — moterų.

1 pav. Šuolio į tolį pasaulio rekordų kaita



Pastaba. Antropometriniai dydžiai: a — atstumas tarp klubo sąnario ir atsispiriamosios kojos masės centro; b — atsispiriamosios kojos ilgis; c — atstumas tarp klubo sąnario ir mojamiosios kojos masės centro; d — pėdos ilgis; Valdomieji dydžiai: δ — pėdos sąnario kampas; φ — kampas tarp atsispiriamosios kojos ir horizontaliosios plokštumos; φ_b — kampas tarp atsispiriamosios ir mojamiosios kojos; m_m ir m_a — mojamiosios ir atsispiriamosios kojos masė, sukcentruota masių centruose; m_k — likusios kūno dalies masė — galvos, kaklo, korpuso ir kt. Šios masės centras atsispirimo metu kampo φ kryptimi keičia savo padėtį, t. y. švytuoja. Vadinasi, ilgis l yra kintamas dydis.

2 pav. Kojų padėtis ir mojamiosios kojos judėjimo modelis

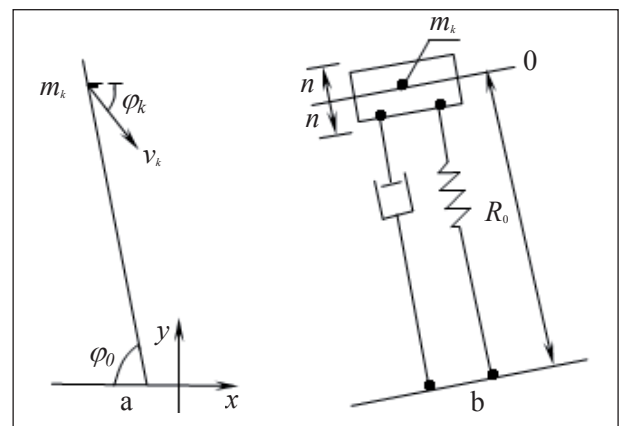
yra sudėtingas. Dėl šios priežasties, kartu ir dėl tikslo ribotumo, analizuojama tik mojamiosios kojos padėties įtaka — sudarytas trijų masių modelis. Juo įvertinamas kojos judrumas per pėdos sąnari. Tokiam modeliui yra sudaroma kinetinio ir varomojo sukimo momentų lygtys. Keičiant įėjimo ir valdomuosius dydžius, nustatoma mojamiosios kojos padėties įtaka šuolio į tolį rezultatams.

MOJAMOSIOS KOJOS JUDĖJIMO MODELIS

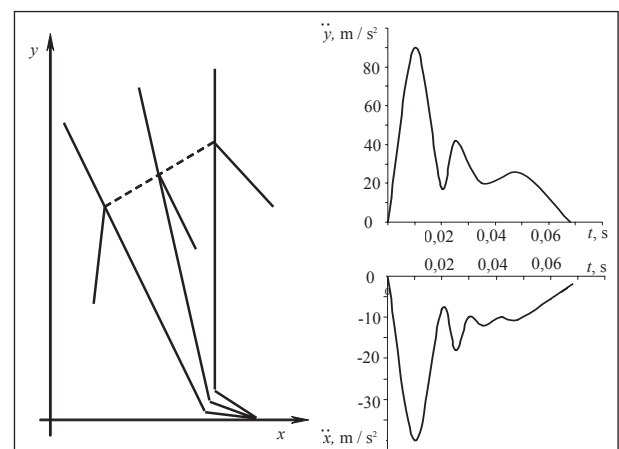
Analizuojant mojamiosios kojos padėties įtaką šuolio į tolį metu yra sudaromas trijų masių strypinis modelis, kurį galima lankstyti taškuose A ir K, atitinkančiuose pėdos ir klubo sąnarius. Kojų padėtis ir modelio geometrinė sandara pateikiama 2 paveiksle.

MASĖS CENTRO PADĖTIES NUSTATYMAS

Ryšys tarp kampų ir likutinės masės m_k greičio pradinės padėties yra pavaizduotas 3 a paveiksle.



3 pav. Skaičiavimo schema



4 pav. Modelio padėtis ir dinamograma

Schemoje pateikiami ir kiti pradiniai dydžiai, reikalingi modeliui analizuoti ir gaunami analizuojant realių šuolių kinogramas ir matomi iš dinamogramų. Kampas φ , apibūdinantis erdvinę (kampinę) modelio padėtį, kaip laiko funkcija skaičiuojamas pagal momentų dėsnį.

Kaip jau buvo minėta, užimant atsispyrimo padėtį, masės centro m_k padėtis kinta. Priežastis — tamprioji žmogaus korpuso deformacija. Be to, žmogaus kūno medžiagos turi slopinamųjų savybių. Todėl strypinių modelių galima pakeisti dinaminio masės slopinimo ir tamriuoju elementu modeliu (3 pav. b). Tokios sistemos judėjimas išilgai R yra aprašomas antros eilės diferencialine lygtimi (Hildebrand, 1997):

$$\ddot{R} + 2\delta\dot{R} + \omega_0^2 R = 0,$$

čia δ — slopinimo pastovioji, ω_0 — masės m_k savasis svyravimų dažnis išilgai R .

Masės m_k atstumas iki atramos R yra kintamas dydis ir nustatomas taip:

$$R = R_0 - ne^{-\delta t} \sin(\omega_d t - \psi) \quad (1)$$

Antras dešinės pusės narys yra diferencialinės lygties sprendinys: n — svyravimų amplitudė, ω_d — slopinamosios sistemos svyravimų dažnis, ψ — fazinis kampas.

Pradiniu momentu, kai $t = 0$, greitis v_k ir kampas φ_k yra žinomi (užduodami).

Slopinimo pastovioji δ yra nustatoma iš logaritminio dekremento formulės:

$$\ddot{R}(t) / \ddot{R}(t + T) = e^{\delta T}$$

Pagreičių amplitudžių santykis ir periodas T imami iš dinamogramos. Žinant T ir δ , pagal įprastines virpesių teorijos formules nustatomi svyravimų dažniai: savasis ir dažnis esant slopinimui:

$$\omega_0 = (\delta + 4\pi^2 / T^2)^{1/2}, \quad \omega_d = (\omega_0^2 - \delta^2)^{1/2} \quad (2)$$

Savaime aišku, kad prasidedant atsispyrimo smūgiui, atsispyrimo pagreitis lygus 0. Tada, suradę 1 lygties antrąją išvestinę \ddot{R} ir prilyginę nuliui, nustatome fazinį kampą:

$$\psi = \arctan \frac{2\delta\omega_d}{\omega_d^2 - \delta^2}$$

Kai $R(0) = R_0$ ir $\dot{R}(0) = -n$, tai:

$$v_k = (n^2\omega_d^2 + R_0^2\omega_0^2)^{1/2}$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{-n\omega_d \sin \varphi_0 + R_0\dot{\varphi}_0 \cos \varphi_0}{n\omega_d \cos \varphi_0 + R_0\dot{\varphi}_0 \sin \varphi_0}$$

arba:

$$\dot{\varphi}_0 = \frac{v_k}{R_0} \sin(\varphi_0 + \varphi_k)$$

$$n = \frac{v_k}{\omega} \cos(\varphi_0 + \varphi_k)$$

(1) formulę taikant 2 paveiksle pavaizduotam modeliui, reikia imti:

$$R = l + b \text{ ir } R_0 = l_0 + b$$

VAROMOJO MOMENTO NUSTATYMAS

Skaičiavimas atliekamas tokia tvarka.

1. Randamos masių centrų koordinatės ir pirmosios išvestinės:

Masės m_a :

$$X_a = d \cos(\varphi + \alpha) - (b - a) \cos \varphi$$

$$Y_a = -d \sin(\varphi + \alpha) - (b - a) \sin \varphi$$

$$\dot{X}_a = -d(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha) + (b - a)\dot{\varphi} \sin \varphi$$

$$\dot{Y}_a = -d(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha) + (b - a)\dot{\varphi} \cos \varphi$$

Masės m_k :

$$X_k = d \cos(\varphi + \alpha) - (b + l) \cos \varphi$$

$$Y_k = -d \sin(\varphi + \alpha) + (b + l) \sin \varphi$$

$$\dot{X}_k = -d(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha) - \dot{l} \cos \varphi + (b + l)\dot{\varphi} \sin \varphi$$

$$\dot{Y}_k = -d(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha) - \dot{l} \sin \varphi + (b + l)\dot{\varphi} \cos \varphi$$

Masės m_m :

$$X_m = d \cos(\varphi + \alpha) - b \cos \varphi + c \cos(\varphi - \varphi_b)$$

$$Y_m = -d \sin(\varphi + \alpha) + b \sin \varphi - c \sin(\varphi - \varphi_b)$$

$$\dot{X}_m = -d(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha) + b\dot{\varphi} \sin \varphi - c(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_b) \sin(\varphi - \varphi_b)$$

$$\dot{Y}_m = -d(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha) + b\dot{\varphi} \cos \varphi - c(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_b) \cos(\varphi - \varphi_b)$$

2. Pagal formules

$$X_c = \frac{\sum m_i X_i}{m} \text{ ir } Y_c = \frac{\sum m_i Y_i}{m}$$

nustatomos masių m_a , m_k ir m_m centro koordinatės:

$$X_C = \frac{1}{m} [(md \cos(\varphi + \alpha) - c_1 \cos \varphi + c_2 \cos(\varphi - \varphi_b)]$$

$$Y_C = \frac{1}{m} [(-md \sin(\varphi + \alpha) + c_1 \sin \varphi - c_2 \sin(\varphi - \varphi_b)],$$

čia: $m = m_m + m_a + m_k$, $c_1 = mb - m_a a + m_k l$, $c_2 = m_m c$.

3. Nustatomas masių centro kinetinis momentas arba sukimo impulsas L .

Tuo tikslu pasinaudojama kinetinio momento formulė materialiam taškui (masių centrui apie atramos tašką) nustatyti (Hauger, Schnell, 1993; Jian Liu et al., 2003):

$$L = m(xv_y - yv_x),$$

čia: $x = X_C$, $y = Y_C$, $v_x = \dot{X}_C$, $v_y = \dot{Y}_C$.

Įrašę reikalingus dydžius į kinetinio momento formulę ir atitinkamai sutvarkę gauname kinetinio momento arba sukimo impulso masių centro išraišką:

$$L = \dot{\varphi}(c_3 - 2dc_1 \cos \alpha + 2c_2 P) - \dot{\alpha}[dm - c_1 \cos \alpha + c_2 \cos(\alpha + \varphi_b)]d - m_k \dot{d} l \sin \alpha + m_m \dot{\varphi}_b (P + c) \quad (3)$$

4. Nustatoma kinetinio momento pirmoji laiko išvestinė. Ji yra lygi ieškomam varomajam momentui: $dL = M$.

Atlikus reikalingus veiksmus gaunama:

$$\begin{aligned} \dot{L} = & -\dot{\varphi}(c_3 - 2dc_1 \cos \alpha + 2c_2 P) - \dot{\varphi}[dc_1 \dot{\alpha} \sin \alpha - c_2 Q + \\ & + m_k \dot{l}(b + l - d \cos \alpha)] \cdot 2 - \dot{\alpha}[dm - c_1 \cos \alpha + \\ & + c_2 \cos(\alpha + \varphi_b)]d - \dot{\alpha}^2 [c_1 \sin \alpha - c_2 \sin(\alpha + \varphi_b)]d - \\ & - dm_k (\dot{l} \sin \alpha + \dot{\alpha} \cos \alpha) - c_2 [-d \dot{\alpha} \dot{\varphi}_b \sin(\alpha + \varphi_b) - \\ & - \dot{\varphi}_b (P + c) + \dot{\varphi}_b Q] \end{aligned} \quad (4)$$

Vartotų žymėjimų reikšmės:

$$c_3 = md^2 - m_a(b - a)^2 + m_k(b + l)^2 + m_m(b + c)^2$$

$$P = d \cos(\alpha + \varphi_b) - b \cos \varphi_b$$

$$Q = d(\dot{\alpha} + \dot{\varphi}_b) \sin(\alpha + \varphi_b) - b \dot{\varphi}_b \sin \varphi_b$$

Pagal (3) apskaičiuotas momentas yra lygus svorio jėgos sukuriamam momentui:

$$\dot{L} = -mg \cdot X_C = g[(md \cos(\varphi + \alpha) + c_1 \cos \varphi - c_2 \cos(\varphi - \varphi_b)].$$

Tai yra ieškomoji diferencialinė lygtis padėties kampui $\varphi(t)$ nustatyti. Ji gali būti išsprędžiama skaitmeniniais metodais.

MODELIAVIMO REZULTATŲ APTARIMAS

Pateiktasis modelis, keičiant įėjimo ir valdomuosius dydžius, suteikia galimybę tyrinėti atsispyrimo procesą nepriklausomai nuo to, ar tokie šuoliai tuo momentu gali būti atliekami, ar ne. Tyrimais nustatoma pagrindinių šuolio elementų — smūgio atsispyrimo metu, kojos tiesimo per

pėdos sąnarį ir mojamąsios kojos padėties įtaka ir jų ryšys šuolio metu. Mojamąsios kojos dinaminiai rodikliai išreiškiami dinamogramomis. Tokių priklausomybių negalima išvesti (gauti) iš filmavimo būdu gauto vaizdo.

Kartu galima nustatyti teorinį šuolio tolį ir jo priklausumą nuo kampinių pagreičių, kuriuos valdo sportininkas. Šiuo būdu gali būti nustatomos rodiklių įvairavimo kryptys, norint nušokti toliausiai ir įvertinti tokių keitimų nuoseklumą. Pirmą kartą nustatomi šuolio tolį lemiantys sukimo impulsai.

Rodiklių modeliavimas rodo, kad mojamoji koja, norint nušokti kuo toliau, turi atlikti keletą funkcijų:

1. Mojamoji koja, turėdama palyginti didelę masę (apie 15% bendrosios kūno masės) ir būdama judriausia kūno dalis, sukaupia didelę kinetinės energijos dalį.
2. Greitėjantis mojamąsios kojos judesys (judesys su pagreičiu) sukuria papildomą slėgį į atsispyriamąją koją. Galima nustatyti jėgų proporcijas, kurioms esant kūnui būtų suteikiamas didesnis jėgos impulsas ir kontakto su žeme metu jam būtų suteikiama daugiau energijos. Efektas yra tuo didesnis, kuo didesnis mojamąsios kojos pagreitis ir kuo didesnis inercijos momentas.
3. Jeigu mojamąsios kojos judesys sustabdomas, tai dalis jos kinetinės energijos persiduoda kūnui, dėl to pėdos sąnarys greičiau gali išsitiesti. Dėl šios priežasties kūno masės centro trajektorija pakeliama ir pasiekiamas didesnis skridimo kampas.

2 ir 3 išvados viena su kita konkuruoja (nes veikia priešingomis kryptimis) šuolio tolio atžvilgiu. Modeliavimas rodo, kad mojamąsios kojos greitinimas (judėjimas su pagreičiu) pagal 2 išvadą sudaro sąlygas toliau nušokti. Galima manyti, kad pėdos sąnaryje gali būti sukelti tokio dydžio jėgos momentai, kad kampiniai pagreičiai mojamąsios kojos greitėjimo ar stabdymo atvejais lieka tokio paties dydžio.

Šiuo metu turimi tik realiai pasiektų pėdos sąnario jėgos momentų įverčiai (4 pav.). Iš modeliavimo galima daryti išvadą šiuos įverčius būtina objektyvizuoti. Nedidelių pėdos sąnario kampo pokyčių šuolių rezultatams iki šiol (neatlikus siūlomo modeliavimo) nebuvo galima nustatyti.

LITERATŪRA

- Bloomfield, J., Acklant, T. R., Elliott, B. C. (1995). *Applied Anatomy and Biomechanics in Sport*. Oxford—Vienna: Blacwell scientific Publications PTY LTD. P 374.
- Haguenauer, M., Legreneur, P., Monteil, K. M. (2005). Vertical jumping reorganization with aging: A kinematic comparison between young and elderly men. *Journal of Applied Biomechanics*, 21, 236—246.
- Hauger, W. Schnell, D. (1993). *Technische Mechanik*. Gross—Berlin—Heidelberg—New York: Springer.
- Hildebrand, F. (1997). *Eine biomechanische Analyse der Drehbewegungen der menschlichen. Koerpers*, Aachen: Mayer & Mayer. P. 140.
- Jian, Liu, Thurmon, E., Lockhart. (2003). *Localization and Inverse Dynamic Simulation in Determining Joint Moments: The Virginia Tech-Wake Forest University School of Biomedical Engineering and Sciences 2nd Student Research Symposium*, May 1. (pp. 23—25).
- Александр, Р. (1970). *Биомеханика* (пер. с англ.). Москва: Мир.
- Бегун, П. И. (2004). *Моделирование в биомеханике: учебное пособие*. Москва: Высшая школа.

ANALYSIS OF LONG JUMP RESULTS AS INTERLINKED TO SWINGING LEG MOTION PARAMETERS

Ginas Čižauskas^{1,2}, Sigita Marija Zdanavičienė¹, Kęstutis Pilkauskas², Albinas Palionis², Adelė Tamošiūnaitė², Kazimieras Pukėnas¹

Lithuanian Academy of Physical Education¹, Kaunas University of Technology², Kaunas, Lithuania

ABSTRACT

The influence of swinging leg (limb) position on long jump results has been analysed in the paper. The long jump result is predefined by the speed reached in accelerating phase, the push-off power, perfection of movements at flight period and landing. For the perfection of jump technique a lot of research has been conducted. Nevertheless unreasonably little of them deal with the influence of swinging leg (limb) position during push-off phase. Using ten segment model for the research of such kind the obtained simulation results only partly conform the experimental ones. Thus, it is worth mentioning that motion analysis applying this model from the viewpoint of input and control parameters variation is rather complicated.

For this reason and the limitations of the objectives only the influence of swinging leg (limb) was analysed and a three-mass model was constructed. Foot mobility at the ankle was evaluated by it. The model chosen for this purpose was a three-mass bar element model which evaluated foot mobility at the ankle. For such model equations of angular momentum and driving torque were derived. The presented model gave the possibility to analyse the push-off (propulsion) process by the variation of input and control parameters independently on the possibility of such jumps to be performed at the present moment.

The influence of the impact of the main jump parameters at push-off process, foot extension at the ankle, swinging leg (limb) position and interaction of these parameters were determined. The influence of dynamic effects of the swinging leg was expressed by dynamographs. It is impossible to derive (obtain) such dependencies from the camera-recorded data. After determination of the body torso swinging frequencies, mass center coordinates of separate elements and their first derivatives were calculated, resultant mass center coordinates were found what enabled to theoretical determination of the jump length in dependence on angular accelerations which were controlled by a sportsperson. The equation of angular momentum first derivative in time giving the driving torque was assessed.

Using this approach it was possible to determine the parameter variation ranges in order to achieve the greatest jump lengths and the sequence predefined by such variation. For the first time angular impulses which are important for the jump length were determined. At present only the actually achieved values of the moments at the ankle are available.

The simulation results suggest a conclusion that these values should be validated. Up to now it was impossible to determine the influence of small changes of the ankle angle (not performing the proposed simulation).

Keywords: swinging leg (limb), long jump, modeling.

Gauta 2008 m. balandžio 28 d.
Received on April 28, 2008

Priimta 2010 m. gegužės 31 d.
Accepted on May 31, 2010

Ginas Čižauskas
Lietuvos kūno kultūros akademija
(Lithuanian Academy of Physical Education)
Sporto g. 6, LT-44221 Kaunas
Lietuva (Lithuania)
Tel +370 37 302668
E-mail g.cizauskas@lkka.lt