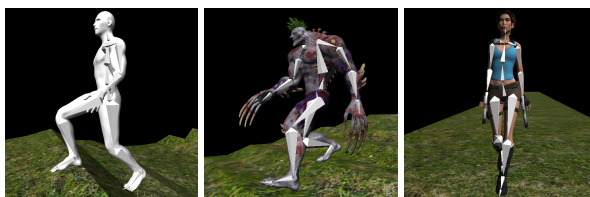


Procedurální animace lidské chůze

Petr Mohelník*



Abstrakt

Tato práce řeší návrh a implementaci procedurálního modelu animace lidské chůze, který umožní specifikaci chůze pomocí parametrů a chůzi po nerovném terénu. K řešení jsou využity znalosti o lidské chůzi. Pro rozhýbání trojrozměrného modelu člověka je použita skeletální animace a pro specifikaci pohybu nohou inverzní kinematika. Vytvořené řešení umožňuje změnu chůze jednoduše pomocí množství parametrů a je schopné se přizpůsobit okolnímu terénu. Výsledek má mít využití při tvorbě počítačových her a umožnit rychlé přidání specifické animace lidské chůze bez nutnosti takovou animaci ručně vytvářet.

Klíčová slova: Procedurální animace — Lidská chůze — Inverzní kinematika — Skeletální animace

Přiložené materiály: N/A

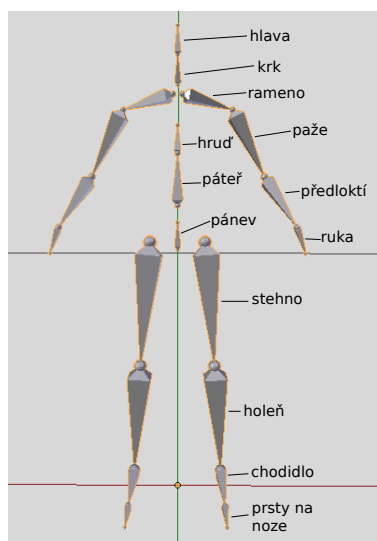
*xmohel01@stud.fit.vutbr.cz, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology

1. Úvod

Animace lidské chůze má velké využití v počítačových hrách. Její ruční vytvoření je velmi náročné. Takto vytvořená animace je poté použitelná pouze pro konkrétní situaci. Existuje mnoho přístupů které řeší algoritmickou tvorbu animace a její adaptování se na změnu prostředí. V této práci se zabýváme procedurální animací.

Procedurální animace využívá znalostí o animovaném pohybu a matematicky ho popisuje. Proto je nastudována lidská chůze a tyto poznatky použity pro rozhýbání abstraktního modelu lidského těla – kostry. Je využita inverzní kinematika pro adaptování se změně parametrů a prostředí. Cílem je vytvoření animace lidské chůze, která bude mít následující vlastnosti. Bude realistická a bude využívat vědecké poznatky z analýzy lidské chůze. Uživatel ji bude moci specifikovat množstvím parametrů. Bude schopna se vyrovnat s překážkami a s obtížně průchozím terénem. A bude ji možno použít pro libovolný trojrozměrný model člověka.

Tradiční metoda tvorby animace je specifikace rotací kloubů pomocí klíčových snímků. Takto vytvořené animace vypadají dobře, ale jsou velmi náročné na vytvoření. Proto se výzkum zabývá metodami, které poskytují animátorovi kontrolu na vyšší úrovni a tedy snižují čas a obtížnost tvorby animace. Podle [1] se dají rozdělit do tří kategorií. První jsou metody editace pohybu [2]. Ty využívají existujících vzorů pohybu (získaných např. pomocí motion capture) a generují z nich nová pohybová primitiva. Vytváří velmi přirozené animace, ale pouze jsou-li změny od vzorů pohybu malé. Také neposkytují fyzikální interakci s prostředím. Fyzikálně založené simulace [3, 4] využívají sil a točivých momentů pro popis pohybu. Tyto metody zachovávají fyzikálně realistický pohyb při externích vlivech a nerovném terénu. Takováto řešení jsou velmi komplexní a mohou mít problémy s časováním a umísťováním končetin a pohyb nemusí vždy působit přirozeně. Třetí skupinou metod je procedurální animace [5, 6]. Ty využívají kinematiky pro popis pohybu, tedy využívají časových a geome-



Obrázek 1. Hierarchická struktura kostry použité v této práci. Každá kost umožňuje rotaci okolo jedné nebo více os.

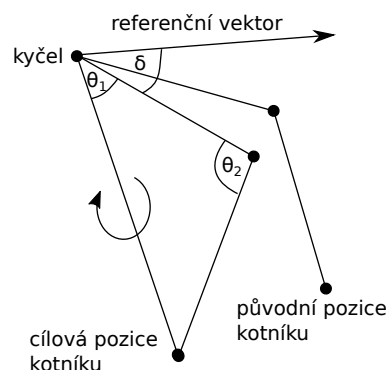
trických vlastností animovaného pohybu. Umožňují využití velkého množství parametrů pro specifikaci animace a jsou málo výpočetně náročné. Takto vytvořené animace nejsou tolik detailní jako u jiných metod. Existují také hybridní řešení [7], která kombinují více přístupů. Článek [8] popisuje procedurální animaci s minimalistickým fyzikálním modelem. V práci [9] je ukázán procedurální model, který využívá vzorů pohybu pro extrakci parametrů.

Naše řešení procedurální animace se inspirované již popsanými přístupy k animaci lidské chůze. Základem je rozdělení animace do fází odpovídajícím fázím cyklu lidské chůze [10]. Rotace kloubů získané studiím lidského pohybu [11, 12, 13] jsou aproximovány pomocí křivek. Využíváme inverzní kinematiky pro pohyb nohou, kde pánev slouží jako kořen kinematického řetězce. Vertikální pohyb pánve je upraven v závislosti na nerovnosti terénu. Trajektorie chodidla je upravena v závislosti na pohybu pánve a tak aby noha neprocházela skrz překážky.

Implementovaný model umožňuje nastavení mnoha parametrů v reálném čase, které umožňují uživateli jednoduše a rychle specifikovat animaci. Model je schopný chůze přes překážky a nerovný terén. Je specifikována konkrétní kostra, která může být použita pro různé trojrozměrné modely.

2. Použité techniky

Pro rozhýbání trojrozměrného modelu je použita technika skeletální animace. Ta využívá abstraktního modelu lidského těla (obrázek 1) nazývaného kostra. Kosti tvoří hierarchickou stromovou strukturu a každá kost má transformační matici určující její transformaci vůči



Obrázek 2. Pro dosažení cílové pozice v kotníku se pomocí kosinové věty určí úhly v kyčli a v koleni. Existuje nekonečné množství rotací okolo osy mezi kyčlí a kotníkem. Tato rotace se určí tak, aby úhel δ mezi stehnem a referenčním vektorem byl co nejmenší. Referenční vektor směřuje vpřed ve směru chůze.

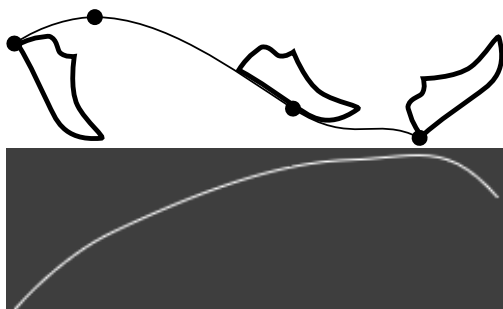
rodičovské kosti. Postupným násobením transformačních matic kostí od kořene k listům se získávají globální transformace jednotlivých kostí. Kostra je připojena k modelu pomocí algoritmu Linear Blend Skinning. Každému vrcholu modelu je přiřazeno m kostí s různými váhami, které určují vliv kosti na výslednou pozici vrcholu. Výsledná pozice $\mathbf{v}'_i$ se poté určí následovně:

$$\mathbf{v}'_i = \left(\sum_{j=1}^m w_{i,j} \mathbf{T}_j \right) \mathbf{v}_i \quad (1)$$

kde $\mathbf{T}$ je transformační matice kosti a $\mathbf{v}$ je původní pozice vrcholu. Tento algoritmus podává dobré výsledky, pokud rotace kloubů nejsou příliš velké (např. rotace v rameni o 180° stupňů).

Dále je v práci použita inverzní kinematika. Inverzní kinematika nám umožní určit takové rotace v řetězci kloubů, aby koncový efektor dosáhl na požadovanou cílovou pozici. Inverzní kinematiku pro obecné řetězce kloubů je možné řešit pomocí numerických metod pro řešení systému nelineárních rovnic [14] nebo iterativních heuristických metod jako je např. metoda Cyclic Coordinate Descent [15]. Protože našim kořenem kinematického řetězce je pánev a koncovým efektem kotník, máme řetězec pouze dvou kloubů. Díky tomu můžeme inverzní kinematiku řešit analyticky a velmi rychle, viz obrázek 2.

Jako interpolační křivky pro aproximaci kinematik kloubů jsme zvolili kubické Bézierovy křivky. Ty nám umožní přesnou aproximaci s malým množstvím kontrolních bodů. Každý segment má dva krajní body kterými křivka prochází a dva další body, které určují její tvar. Pro hladkou návaznost segmentů je nutné zajistit aby třetí bod předchozího segmentu a druhý následujícího byly kolineární. Pro získání parametru t



Obrázek 3. Nahoře je trajektorie paty při švihové fázi pro chůzi po rovném terénu. Trajektorie začíná odrazem nohy od země a je vhodně upravena, aby odpovídala aktuální pozici paty. Trajektorie končí při dotyku paty se zemí. Dole je upravená trajektorie při chůzi do kopce a přes překážku.

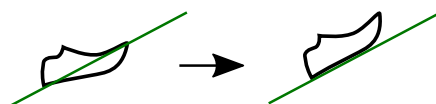
Bézierovy křivky odpovídající konkrétní hodnotě na ose x používáme numerickou metodu Regula Falsi. Ta konverguje vždy a v našem případě kdy řeší hladké a monotónní křivky i velmi rychle.

3. Pohyb nohou

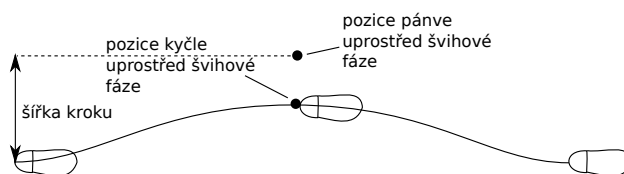
Cyklus lidské chůze se skládá z fází. Krok začíná úderem paty. To je okamžik kdy noha přejde ze švihové fáze do stojné a dotkne se patou země, prsty jsou ve vzduchu. Následuje fáze zatěžování kdy se chodidlo postupně sklápí dokud se celé nepoloží na zem. Úhel mezi chodidlem a zemí určujeme lineární interpolací mezi úhlem chodidla se zemí při úderu paty a nulovým úhlem. V následující fázi chodidlo rotuje tak, aby byl udržen nulový úhel se zemí. Dále následuje příprava na švihovou fázi a to zvedání paty. Prsty zůstávají na stejné pozici na zemi a pata se zvedá. Úhel chodidla se zemí v čase určujeme pomocí Bézierovy křivky. Maximální velikost tohoto úhlu se zvyšuje s délkou kroku, aby byl umožněn větší dosah nohy a fáze na sebe navazovaly plynuleji. V průběhu těchto fází se pánev pohybuje vpřed, proto musí být přepočítávány rotace kloubů nohy pomocí inverzní kinematiky, aby se kotník pořád nacházel ve vhodné pozici.

Poté co noha přejde do švihové fáze, začne se přesouvat na pozici dalšího kroku. Tato pozice je určena délkou kroku a výškou terénu v místě dopadu paty. Trajektorii nohy určujeme podle křivky, která určuje pozici paty při chůzi po rovině [16], viz obrázek 3. Křivkou také určujeme rotaci chodidla v průběhu švihové fáze, při ní se kotník vrací do přibližně neutrální polohy. Tyto křivky je nutné přizpůsobit nerovnostem terénu.

Před samotnou švihovou fází provedeme její simulaci. Z trajektorie pánve určíme polohu pánve na konci švihové fáze (úder paty) a pomocí inverzní kinematiky nohu přesuneme na pozici dalšího kroku s cílovou



Obrázek 4. Pozice chodidla na terénu při dopadu paty s původní rotací a po úpravě rotace.



Obrázek 5. Přesun chodidla během švihové fáze v závislosti na šířce kroku.

rotací chodidla. Pokud se chodidlo nenachází nad terénem (to může nastat při sklonu terénu do kopce), upravíme křivku rotace chodidla, aby při cílové rotaci chodidlo dopadlo na zem se stejným sklonem jako je sklon terénu (obrázek 4).

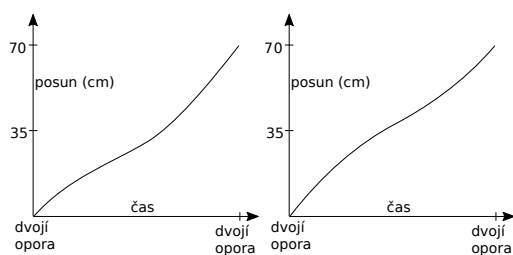
Když máme upravenou rotaci chodidla můžeme odsimulovat celou švihovou fázi. Trajektorii chodidla natočíme tak, aby cílová výška odpovídala další pozici kroku. Poté s vhodným časovým rozestupem určíme pozici pánve a paty a chodidlo rotujeme. Když je pozice paty mimo dosah nohy, tzn. vzdálenost od pánve je větší než délka nohy, křivku v daném místě adekvátně zvedneme. Také ji zvedneme, když se pozice paty nebo prstů nachází pod terénem.

Chodidlo po odrazu paty postupně přesouváme na šířku kyčle. Té dosáhne v polovině švihové fáze a poté je přesouváno zpátky na aktuální šířku kroku (obrázek 5). Chůze takto působí přirozeněji, než když chodidlo kopíruje přímku mezi původní a následující pozicí. Dále se noha vpřed nepřesunuje rovnoměrnou rychlostí [6], ale rychlost je nejvyšší uprostřed švihové fáze a nejnižší na začátku a na konci. Proto využíváme křivku, kterou aproximujeme posunutí nohy vpřed.

4. Pohyb pánve

Pánev slouží jako kořen kinematického řetězce. Odvíjí se od ní nejen pohyb nohou, ale i horní poloviny těla. Pánev rotuje ve všech třech rovinách – frontální, horizontální a sagitální. Pánev se vpřed nepohybuje po přímce, ale v horizontální a sagitální rovině její trajektorie připomíná sinusoidu. V sagitální rovině je maximální vertikální posun uprostřed stojné fáze a minimální ve fázi dvojí opory. Pro umožnění chůze po nerovném terénu budeme přizpůsobovat právě vertikální posun pánve. Použití Bézierových křivek nám umožní proložit krajní kontrolní body segmentů maximum a minimum této trajektorie.

Dále se pánev pohybuje vpřed s variací v rychlosti. Pohyb se zrychluje se snižováním vertikální pozice



Obrázek 6. Posun pánve v čase mezi dvěma oporami, vlevo chůze po rovině, vpravo z kopce.

a je nejrychlejší uprostřed dvojí opory, kdy je kinetická energie nejvyšší. Nejpomaleji se pánev pohybuje ve vertikálním maximu uprostřed stejné fáze. Posun pánve vpřed určujeme podle křivky, kterou jsme vytvořili podle grafu uvedeném v [6]. Vertikální minimum je v čase vždy uprostřed dvojí opory. Pozice pánve se ale může lišit kvůli variaci rychlosti pánve, ke které dochází při chůzi po nerovném terénu, viz obrázek 6.

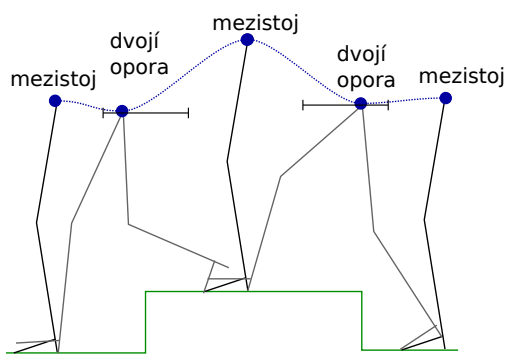
Při chůzi po nerovném terénu vertikální maximum pánve upravíme podle pozice stejné nohy, aby propnutí kolena bylo nezměněno. Rozdíl ve výšce terénu v pozici předchozího a následujícího umístění chodidla určuje změnu ve vertikálním maximu. Jestliže výška terénu je pro další krok nižší, snížíme o tuto hodnotu i vertikální minimum. Díky tomu může noha dosáhnout na cílovou pozici. Pokud je následující pozice nohy výše než předchozí, vertikální minimum neměníme, protože při chůzi do kopce se noha pokrčí v kolenu a nemá problém dosáhnout na cílovou pozici. Výškový rozdíl pánve poté vyrovnáme až při narovnávání stejné nohy, viz obrázek 7.

Pro určení pozice pánve ve vertikálním minimu je použit optimální přístup využívající rovnici z článku [6]. Vybírá se taková pozice pánve, aby úhlová akcelerace kloubů stejné nohy byly minimální. Protože chceme mít určenou trajektorii pánve již před určováním trajektorie švihové nohy, určíme ji v okamžiku dvojí opory (DO), než se švihová noha odrazí od země.

Opakovaně určujeme pozici pánve ve vertikálním minimu z rozsahu možných pozic (obrázek 7) mezi následujícími dvěma mezistojí (MS) a upravujeme křivku rychlosti pohybu pánve, aby pánev touto pozicí procházela. Poté simulujeme pohyb stejné nohy pomocí inverzní kinematiky pro pohyb pánve mezi mezistojí a určíme koeficient c podle následující rovnice:

$$c = \sum_{i=1}^3 \mathbf{W}_i \int_{t_{MS}}^{t_{DO}} f_i(t) d^2t + \sum_{j=1}^3 \mathbf{W}_j \int_{t_{DO}}^{t_{MS}} f_j(t) d^2t \quad (2)$$

kde $f_i(t)$ je rotace i -tého kloubu v kinematickém řetězci pro danou pozici pánve a chodidla a čas t , $\mathbf{W}_i$ je váha i -tého kloubu.



Obrázek 7. Změna vertikální pozice pánve při chůzi po nerovném terénu. Obrázek také znázorňuje možné pozice pánve v dvojí opoře.

Nakonec se z těch pozic, pro které stejná noha v průběhu celého kroku dosáhne na svoji pozici na zemi, vybere ta s nejmenším c a je použita pro následující krok. V článku [6] určují také vertikální pozici pánve. Tu my máme určenou parametrem velikosti amplitudy v sagitální rovině. Díky tomu máme menší množství pozic, které musíme prozkoumat, máme lepší kontrolu nad vertikálním posunem, ale pohyb není z hlediska akcelerace kloubů tolik optimální.

5. Pohyb horní poloviny těla

Lidský trup při chůzi vyrovnává rotaci pánve a natáčí ramena do opačného směru než pánev. Hlava směřuje vpřed a výrazně se nehýbe. V horizontální rovině je rotace ramen podobná rotaci pánve. Má opačnou amplitudu a dosahuje maxima před fází dvojí opory a během ní zůstává nezměněna. Rotaci mezi pávní a rameny rovnoměrně rozkládáme mezi páteř, hrud' a ramena. Hlavu i krk rotujeme aby hlava směřovala vpřed.

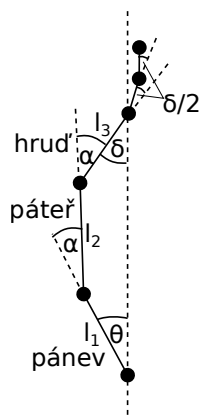
Ve frontální rovině rotaci pánve vyrovnáváme tak, aby pozice krku byla ve svislé poloze s pávní (obrázek 8). Úhel potřebné rotace páteře a hrudi α pro danou rotaci pánve θ je získán vyřešením následující rovnice:

$$l_1 \sin(\theta) = l_2 \sin(\theta + \alpha) + l_3 \sin(\theta + 2\alpha) \quad (3)$$

Ruce na počátku nastavíme do pozice podél těla pomocí inverzní kinematiky. Poté je pomocí Bézierových křivek rotujeme v rameni a lokti. Ruce se pohybují v opačném směru než nohy, tzn. jsou v největším rozpětí ve fázi dvojí opory.

6. Nastavování parametrů

Systém umožňuje nastavování parametrů chůze v reálném čase. Pro parametry jako je pozice a rotace pánve a rukou je možné zvětšovat amplitudu Bézierových křivek. Aby byl pohyb při změně parametrů plynulý, musíme zajistit návaznost segmentů. Toho dosáhneme



Obrázek 8. Pohyb trupu a hlavy v závislosti na rotaci pánve ve frontální rovině. Trup je rotován tak, aby pozice krku byla v ose nad pánví.

tak, že změním hodnotu třetího a čtvrtého kontrolního bodu následujícího segmentu od aktuální pozice, viz obrázek 9. A dále změním hodnoty všech následujících kontrolních bodů.

Na nejvyšší úrovni kontroly umožňujeme specifikovat rychlost chůze. Výzkum [17] ukazuje, že se zvyšující se rychlost chůze se snižuje pohyb pánve v horizontální rovině a zvyšuje ve vertikální rovině. Také se zvyšuje délka kroku, počet kroků za minutu a šířka kroku. Aby nohy dosáhly na požadovanou délku kroku, snižujeme i maximální výšku pánve, přestože se v článku nezmiňuje.

7. Implementace

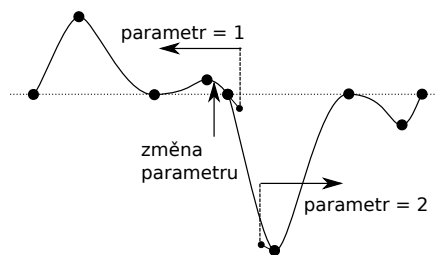
Implementace je provedena v jazyce C++ a pro vizualizaci je použito OpenGL. Trojrozměrné modely člověka spolu s připojenou kostrou jsou načítány z formátu COLLADA. Pro demonstraci jsou vytvořené různé terény – rovné a nerovné. Pro nastavování parametrů slouží posuvníky grafického uživatelského rozhraní. To také zobrazuje některé zajímavé křivky. Použité trojrozměrné modely jsou převzaty z [18, 19, 20].

Aplikaci jsme testovali na notebooku Asus K53SV s Intel Core i5 procesorem a GeForce GT 540M grafickou kartou. Vykreslení jednoho snímku trvá průměrně 5ms. Tato doba je nezávislá na komplexnosti terénu. V průběhu jednoho kroku mají dva snímky výrazně delší dobu výpočtu – když se určuje trajektorie pánve a upravuje trajektorie nohy ve švihové fázi. Při nedostatku výpočetního výkonu může v těchto snímcích docházet k neplynulosti animace. V tabulce 1 je uvedeno kolik procent z celkového času zabírají některé části aplikace.

Pro porovnání podobný systém [6], který je také procedurální a řeší chůzi po nerovném terénu, je schopen vypočítat 3.75 kroků za vteřinu s 10 snímky na krok na procesoru Pentium-II 300 MHz. Tento systém

Tabulka 1. Podíl částí řešení na celkovém času, který aplikace stráví na CPU. Části řešení se nevyklučují.

Funkce	Procento celkového času
Vykreslování scény	25
Vykreslování GUI	35
Řešení inverzní kinematiky	5
Určení pozice pánve	10
Vyhodnocování křivek	3
Řešení rukou	0.6
Řešení nohou	5
Řešení páteře	0.08



Obrázek 9. Bézierova křivka určující rotaci pánve ve frontální rovině. Při změně parametru jsou změněny kontrolní body začínající třetím kontrolním bodem následujícího segmentu.

neřeší horní polovinu těla a zobrazování trojrozměrného modelu.

8. Závěr

V tomto článku jsme se zabývali implementací animace lidské chůze s nastavitelnými parametry a možností chůze po nerovném terénu. Nastínili jsme si možné přístupy k tomuto problému a popsali některé techniky použité v našem řešení. Dále jsme popsali pohyb lidského těla při chůzi a navržený algoritmus pro jeho animaci.

Podarilo se nám za využití interpolačních křivek a inverzní kinematiky vytvořit realistickou animaci lidské chůze. K tomu jsme se inspirovali existujícími řešeními pro pohyb pánve a využili vlastní řešení pro pohyb horní poloviny těla a nohou.

Výsledky práce by mohli být použity při tvorbě počítačových her. V takovém případě by bylo vhodné implementovat animace iniciace a zastavení chůze a případně i animace běhu. Také by po implementaci exportu animace do souborového formátu bylo možné práci využít pro tvorbu animace klíčových snímků.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lukáši Polokovi za vedení a odbornou pomoc.

Literatura

- [1] H. Van Welbergen, B. J. H. Van Basten, A. Egges, Zs. M. Ruttkay, and M. H. Overmars. Real time animation of virtual humans: A trade-off between naturalness and control. *Computer Graphics Forum*, 29(8):2530–2554, 2010.
- [2] Franck Multon, Richard Kulpa, Ludovic Hoyet, and Taku Komura. Interactive animation of virtual humans based on motion capture data. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 20(5-6):491–500, 2009.
- [3] Stelian Coros, Philippe Beaudoin, and Michiel van de Panne. Generalized biped walking control. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4):Article 130, 2010.
- [4] Jia-chi Wu and Zoran Popović. Terrain-adaptive bipedal locomotion control. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4):72:1–72:10, Jul. 2010.
- [5] Armin Bruderlin and Tom Calvert. Interactive animation of personalized human locomotion. In *Proceedings of Graphics Interface '93*, GI '93, pages 17–23, Toronto, Ontario, Canada, 1993. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [6] Shih-kai Chung and James K. Hahn. Animation of human walking in virtual environments. In *Proceedings of the Computer Animation*, CA '99, pages 4–, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [7] A. Bruderlin and T. W. Calvert. Goal-directed, dynamic animation of human walking. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 23(3):233–242, July 1989.
- [8] I. D. Horswill. Lightweight procedural animation with believable physical interactions. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 1(1):39–49, March 2009.
- [9] Rune Skovbo Johansen. *Automated semi-procedural animation for character locomotion*. PhD thesis, 2009.
- [10] Ashutosh Kharb, Vipin Saini, YK Jain, and Surender Dhiman. A review of gait cycle and its parameters. *IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management*, 13:78–83, 2011.
- [11] Jean-Charles Ceccato, Mathieu De Sèze, Christine Azevedo, and Jean-René Cazalets. Comparison of trunk activity during gait initiation and walking in humans. *PLoS One*, 4(12):e8193, 2009.
- [12] Steven H. Collins, Peter G. Adamczyk, and Arthur D. Kuo. Dynamic arm swinging in human walking. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 276(1673):3679–3688, 2009.
- [13] Yi-Chung Lin, Margit Gfoehler, and Marcus G Pandy. Quantitative evaluation of the major determinants of human gait. *Journal of biomechanics*, 47(6):1324–1331, 2014.
- [14] Samuel R. Buss. Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods. Technical report, IEEE Journal of Robotics and Automation, 2004.
- [15] Chris Welman. *Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation*. PhD thesis, Simon Fraser University, 1993.
- [16] Farzin Dadashi, Benoit Mariani, Stephane Rochat, Christophe J. Büla, Brigitte Santos-Eggimann, and Kamiar Aminian. Gait and foot clearance parameters obtained using shoe-worn inertial sensors in a large-population sample of older adults. *Sensors*, 14(1):443, 2014.
- [17] Michael S Orendurff, Ava D Segal, Glenn K Klute, Jocelyn S Berge, et al. The effect of walking speed on center of mass displacement. *Journal of rehabilitation research and development*, 41(6A):829, 2004.
- [18] Paul Chen. TF3DM: male base mesh 3d model. <http://tf3dm.com/3d-model/male-base-mesh-6682.html>. [cit. 2016-04-24].
- [19] TF3DM: venom joker rigged 3d model. <http://tf3dm.com/3d-model/venom-joker-rigged-36682.html>. [cit. 2016-04-24].
- [20] TF3DM: lara croft 3d model. <http://tf3dm.com/3d-model/lara-croft-18784.html>. [cit. 2016-04-24].