



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Matěj Ščerba

Analýza videozáznamu skoku o tyči

Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Bartoš, Ph.D.

Studijní program: Informatika (B1801)

Studijní obor: IOI (1801R008)

Praha 2021

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Poděkování.

Název práce: Analýza videozáznamu skoku o tyči

Autor: Matěj Ščerba

Katedra: Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Bartoš, Ph.D., Katedra softwarového inženýrství

Abstrakt: Skok o tyči je jedna z technicky náročnějších lehkootletických disciplín, proto se analýzou skoků na většině mezinárodních závodů zabývají ????. Pro trenéry a závodníky by bylo vhodné, aby měli k dispozici podobné prostředky i při trénincích, aniž by museli investovat do specializované techniky. Má práce tuto problematiku řeší. S použitím počítače a kamery lze z jediného videozáznamu získat model atleta a zároveň analyzovat parametry jím provedeného skoku. Výsledné parametry se posléze zanesou do grafů a jejich hodnoty lze zkoumat i v různých fázích skoku za použití prohlížeče videozáznamu.

Klíčová slova: skok o tyči detekce pozice těla videozáznam

Title: Analysis of pole-vault video recording

Author: Matěj Ščerba

Department: Department of Software Engineering

Supervisor: Ing. Michal Bartoš, Ph.D., Department of Software Engineering

Abstract: Abstract.

Keywords: pole vault human pose detection video recording

Obsah

Úvod	2
1 Teorie	3
1.1 Skok o tyči	3
1.1.1 Analýza technického provedení skoku	3
1.1.2 Analýza biomechanických parametrů skoku	4
1.2 Zpracování obrazu	6
1.2.1 Detekce člověka	6
1.2.2 Tracker	6
1.2.3 Detekce kostry	6
2 Realizace	7
2.1 Návrh řešení	7
2.1.1 Zpracování videa	7
2.1.2 Nalezení atletova těla ve videu	7
2.1.3 Detekce kostry atleta	7
2.1.4 Zisk modelu atleta z detekované kostry	9
2.1.5 Analýza pohybu atletova těla	9
2.1.6 Zobrazení výstupu analýzy	9
3 Experimentální část	10
Závěr	11
Seznam použité literatury	12
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	14
Seznam použitých zkratk	15
A Přílohy	16
A.1 První příloha	16

Úvod

Při trénincích a soutěžích ve skoku o tyči využívají atleti spolu s trenéry videozáznamy provedených skoků. Videozáznam poté využívají pro detekci chyb v technickém provedení skoku a jejich případný vliv na výsledný výkon. Pro výkon při skoku o tyči jsou kromě techniky důležité také biomechanické parametry skoku. Mezi tyto parametry patří například rychlost atleta při rozběhu.

V tréninkovém procesu je důležité sledovat výkonnost atleta. K tomuto účelu slouží především měření času běhu různých vzdáleností. Pro skok o tyči je vhodné aplikovat podobné metody právě při skokanských trénincích. Jednou z možností, jak toho docílit, je použití specializované techniky pro měření rychlosti atleta při rozběhu. Mezi specializovanou techniku lze zařadit radary nebo fotobuňky. Za použití vhodně rozmístěných fotobuněk lze poměrně přesně určit rychlost v různých částech rozběhu. Využití těchto metod je finančně náročné a jediným parametrem, který lze sledovat je pouze rozběhová rychlost atleta.

S rozvojem počítačového vidění přibývá na světových atletických soutěžích studií¹ zabývajících se pohyby sportovců. Výsledky těchto studií jsou pro atlety a jejich trenéry vynikající zpětnou vazbou. Tyto studie využívají několik kamer k zachycení pohybu atleta, kamery nejprve kalibrují za použití přesně změřených konstrukcí s vyznačenými body. Pro analýzu pohybu poté využívají 3D model atleta, který z videí získají. Výsledný model zachycuje polohu kloubů těla a na základě jejich pohybů lze jeho pohyb analyzovat. Takovýto model je možné použít k analýze mnohem více parametrů skoku o tyči než jen rychlosti běhu atleta.

Studie se většinou zabývají porovnáváním pohybu různých atletů na základě získaných parametrů. V tréninkovém prostředí je zvykem využívat pouze videozáznamy a případné porovnání skoků probíhá spuštěním záznamů, které dané skoky zachycují, následným rozbořením techniky jednotlivých skoků a hledáním případných rozdílů. Tato forma porovnání skoků ovšem nebere v potaz biomechanické aspekty pohybu atleta, které mohou techniku skoku ovlivnit. Hodnoty parametrů, kterými se specializované studie zabývají, lze z videa odhadnout pro účely porovnání skoků, ale ani zkušenosti trenérů nejsou schopni přesně určit jejich hodnoty.

Podobné studie pohybu jsou užitečným tréninkovým prostředkem, ovšem jejich využití jen v malém počtu tréninků se nejeví jako reálné. Dostupnějším přístupem k tomuto problému by byla aplikace, běžící na mobilním zařízení, která by analyzovala pohyb atleta na základě modelu získaného z jediného videa. Výsledkem této analýzy by byly graficky znázorněné parametry skoku a případné porovnání s hodnotami parametrů jiných skoků. Takováto aplikace by výrazně přispěla k přesnější analýze tréninkových a závodních skoků mimo soutěže světové úrovně.

Má práce představuje základ pro vznik podobné aplikace. Mým cílem je extrakce modelu atleta z jediného videozáznamu, jeho následná analýza pro získání hodnot příslušných parametrů a následné zobrazení hodnot parametrů jejich zanesením do grafů.

¹Příklady studií a biomechanických zpráv lze nalézt na <https://www.worldathletics.org/about-iaaf/documents/research-centre>

1. Teorie

1.1 Skok o tyči

Skok o tyči je jedna z technicky náročných atletických disciplín. Atlet se nejprve s tyčí rozběhne po rozběžisti, následně zasune tyč do kastlíku, poté se odrazí, provede skok a dopadne do doskočiště.

Atlet se při skoku pohybuje vzhůru za pomoci narovnávací se tyče, kterou ohne s použitím energie získané při rozběhu. Tyče se liší délkou a tvrdostí, tvrdší tyč je náročnější ohnout, aby atleta vynesla přes latku, ale výsledná energie tyče je vyšší, a tedy vyústí ve vyšší skok.

Pro pozici těla atleta při rozběhové fázi je typický značně omezený pohyb paží a mírné natočení trupu. Důvodem tohoto nestandardního způsobu běhu je skutečnost, že atlet nese tyč, a přesto se snaží vyvinout maximální kontrolovanou rychlost. Rychlosti, které atlet dosahuje v momentu odrazu, se říká náběhová rychlost. Při skoku o tyči (a všech ostatních skokanských disciplínách) má atlet vyznačené místo, ve kterém začíná svůj pokus. Toto místo si volí sám, vliv na jeho polohu má především fyzická zdatnost atleta a počet kroků rozběhu. Počet kroků závodního rozběhu atletů světové úrovně se pohybuje v rozmezí 16 až 20 kroků, tedy přibližně 35 až 45 metrů od zadní hrany kastlíku. Atlet se rozbíhá s tyčí ve vzduchu, postupně ji spouští, dokud není rovnoběžně se zemí. Následně provádí zásun - pohyb, při němž zasune tyč do kastlíku a dostane paže nad hlavu. V pozici s pažemi nad hlavou se atlet odráží a přenáší energii do tyče. Na charakter skoku má vliv také místo odrazu. Následný skok lze rozdělit do několika částí.

První z nich je odraz, při němž je kladen důraz na efektivitu přenosu energie získané při rozběhu do tyče. Po této krátké fázi skoku následuje zvrát. Jedná se o pohyb způsobený švihnutím odrazové nohy a paže, která se tyče drží výše, proti sobě - směrem dopředu. Po provedení zvrátu se atlet dostane do pozice vzhůru nohama. V této pozici atlet provádí obrat, při němž se otáčí o 180 stupňů podél vertikální osy, aby byl čelem k latce. Následuje odraz od tyče a přechod latky, v této fázi se atlet snaží dostat boky co nejvýš a zajistit tak plynulý skok přes latku. Latku atlet překonává nohama napřed, čelem k latce.

1.1.1 Analýza technického provedení skoku

Způsob provedení skoku je podstatným ukazatelem pro výsledný výkon. Jen drobná změna v jediné fázi pokusu může dramaticky ovlivnit charakter a výšku celého skoku. Tím pádem mají skokané o tyči pro nácvik techniky vyhrazeno několik tréninků týdně. Jedná se o skokanské tréninky a tréniny zabývající se nácvikem techniky prostřednictvím gymnastických prvků simulujících pohyb atleta na tyči. Pro mou práci jsou důležitější skokanské tréninky.

Skokanské tréninky začínají podobně, jako ostatní atletické tréninky, tedy rozcvičením. Po klasickém rozcvičení následuje příprava na samotné skákání, tato příprava se u jednotlivých atletů může lišit. V naší tréninkové skupině je zvykem provést několik cvičných zásunů a rozběhů s tyčí. Následují skoky z krátkého rozběhu, standardně se jedná o 6 kroků. Již na základě těchto cviků lze určit, na jaké prvky skoku by se měl atlet zaměřit. Po této fázi následuje skákání z dlouhého

rozběhu. Počet kroků se liší podle fáze sezony, ve které se atlet nachází. V závodním období jsou typické rozběhy delší, v přípravném období kratší, jelikož tréninky v přípravném období jsou zpravidla fyzicky náročnější.

Při tréninku se opakuje následující situace. Atlet provede skok a následně ho konzultuje s trenérem. Předmětem konzultace je především technické provedení skoku. S rozvojem moderních technologií jsou konzultace ve většině případů doprovázeny sledováním a rozбором videozáznamu zahycujícího právě provedený skok. S pomocí tohoto videozáznamu lze přesně určit místo odrazu a pohyb atleta při rozběhu a následném skoku. Na pořízeném videozáznamu lze spolehlivě detekovat technické nedostatky skoků, které by se atlet měl v následujících pokusech snažit eliminovat.

Videozáznam je nejčastěji pořizován na mobilní telefon, případně tablet. Pozice kamery se nejčastěji nachází na kolmici k rozběžišti, která prochází místem odrazu. Z tohoto místa je poměrně dobře vidět jak rozběh, tak skok. Navíc se takto s velikou přeností dá určit místo odrazu a pozice atletova těla při přenosu energie do tyče při odrazu. Strana, z které je skok natočen se často mění, záleží na prvku skoku, který má trenér s atletem v plánu zkoumat.

Závody probíhají podobně, po každém skoku opět dochází ke konzultaci, ovšem na mezinárodních závodech není běžné, že by atlet viděl záznam skoku, který trenér pořídil. Při závodech není kladen takový důraz na změny v technice jako při tréninku, typicky probíhá jen rozbor detailů nebo posouvání místa odrazu pro optimální přenos energie do tyče.

1.1.2 Analýza biomechanických parametrů skoku

S rozvojem moderní techniky přibývá studií zabývajících se pohybem těla atleta při skoku o tyči. Podkladem pro tyto studie jsou především mezinárodní závody, případně mistrovství republiky. Příkladem je biomechanická zpráva z finále mužů Mistrovství světa v atletice 2017¹, na níž se podíleli pracovníci Leeds Beckett University.

K analýze parametrů se využívá několik kamer, jejichž záznam slouží jako podklad k vytvoření modelu atleta v průběhu celého skoku. Tento model je následně analyzován pro získání konkrétních parametrů skoku. Podobné studie se nejčastěji zabývají následujícími parametry:

Délka kroků rozběhu

Na efektivitu přenosu energie do tyče má vliv délka kroků na konci rozběhu. U většiny atletů je poslední krok rozběhu kratší oproti předešlým krokům. Rozdíl v délce předposledního a posledního kroku se může pohybovat v řádech desítek centimetrů. Důvodem pro zkrácení posledního kroku je sešlápnutí posledního kroku pod tělo atleta, tím atlet ztratí méně horizontální rychlosti při odrazu. Zkrácení posledního kroku doprovází odraz pod menším úhlem, což pro skok o tyči není tak velký problém jako pro skokany do dálky.

¹Ke stažení na <https://www.worldathletics.org/download/download?filename=e2903e25-0ee3-43d2-b031-1af5a3b84fb8.pdf&urlslug=Men%27s%20pole%20vault%20-%202017%20IAAF%20World%20Championships%20Biomechanical%20report>

Doba oporové fáze kroku

Technika běhu je značně ovlivněna dobou oporové fáze jednotlivých kroků. Doba oporové fáze souvisí s rychlostí běhu, mírou pokrčení stojné nohy a výškou boků a kolen. Z prostého videozáznamu se složitě určuje doba oporové fáze kroku, a tudíž se při této analýze věnuje zvýšená pozornost právě míře pokrčení stojné nohy a výšce boků a kolen.

Doba oporové fáze kroku a délka kroku se kromě analýzy videozáznamu dá měřit speciálními pásy, které se položí na zem po obou stranách rozběžiště.

Náběhová rychlost

Náběhová rychlost má značný vliv na přenos energie rozběhu do tyče, rychlejší atleti tedy zpravidla používají tvrdší tyče, které umožňují vyšší skoky.

Náběhovou rychlost lze měřit několika způsoby. Pro tréninkové účely se nejčastěji používají rovnoměrně rozmístěné fotobuňky, z doby běhu mezi nimi lze snadno vypočítat průměrnou rychlost v daném úseku. Tuto metodu používají především sprinteři, pro skok o tyči není příliš vhodná, rychlost se v momentu odrazu dramaticky mění a tyč může ovlivnit detekci fotobuňek. Následující možností je použití radaru, s kterým lze zanést aktuální rychlost do grafu. Při snímání atleta ze zadu téměř nedochází k chybám měření. Způsob měření náběhové rychlosti použitý ve výše zmíněné studii spočívá v analýze detekovaného modelu v souřadném systému, který umožňuje výpočet rychlosti jednotlivých částí těla ve standardních jednotkách, typicky se uvádí v ms^{-1} .

Výška boků v průběhu rozběhu

V průběhu rozběhu je zajímavé pozorovat výšku boků, výrazné výkyvy výšky boků mají za následek výkyvy rychlosti. Plynulost rozběhu tedy koreluje s plynulostí výšky boků v průběhu rozběhu. Pro rovný skok je důležité, aby se atlet rozeběhl kontrolovaně, což se může projevit ve výšce boků, výkyvy ve výšce boků také souvisí s proměnlivou délkou kroků a dobou oporové fáze kroku. Nejdůležitější moment pro zkoumání výšky boků jsou poslední kroky rozběhu.

Místo odrazu

Vzdálenost místa odrazu od zadní hrany kastlíku je podstatným ukazatelem efektivity přenosu energie do tyče. Je vhodné, aby měl atlet v místě odrazu horní paži přímo nad sebou. Vhodná vzdálenost místa odrazu je individuální, někteří atleti preferují odraz blíže ke kastlíku než jiní. Pozice odrazu se odvíjí od technického provedení skoku, výšky a odrazových schopností atleta.

Výška úchopu

Hodnota tohoto parametru souvisí s délkou tyče a odvíjí se od ní místo odrazu. Může se uvádět jako vzdálenost úchopu horní ruky od spodního konce tyče nebo jako výška úchopu horní ruky nad zemí, když je tyč v kastlíku. Kastlík je hluboký 20 cm, tedy hodnota po měření první metodou je o 20 cm vyšší než s použitím druhé metody. Hodnota tohoto parametru má vliv na dobu trvání skoku, vyšší úchop znamená delší dobu trvání skoku.

Úhel odrazu

Pro správný převod energie rozběhu do tyče je užitečné zkoumat úhel odrazu. Uvádí se jako úhel mezi zemí a směrem, kterým se po odrazu pohybuje těžiště. Větší úhel znamená vyšší odraz, ale také větší ztrátu rychlosti při odrazu. Optimální hodnota úhlu odrazu různých atletů se liší například v závoslosti na jejich tělesné výšce.

Úhly v kloubech při odrazu

Pozice těla při odrazu je pro přenos energie do tyče také důležitá. Pokud je atletův trup nakloněn dopředu, jeho ramena a paže jsou v lepší pozici pro roztlačení tyče. Naopak pokud je atlet v záklonu, jeho boky po odrazu snáze ujedou směrem dopředu a ramena zůstanou vzadu. To má za důsledek horší roztlačení tyče.

Doba trvání skoku

Doba trvání skoku je vymezena odrazem od země a opuštěním tyče. Na hodnotu tohoto parametru má vliv mnoho faktorů. Technika je jedním z nich, standardně se atleti odrážejí od tyče vzpaženou paží, jsou ovšem atleti, kteří se tyče pustí dříve. Doba skoku za použití klasického odražení se vzpaženou paží se pohybuje okolo 1,3 s, nestandardní technika může tuto hodnotu stlačit až k 0,7 s. Tyto hodnoty se týkají mužského finále z Mistrovství světa v atletice 2017. Dále má na délku skoku vliv tvrdost tyče, tvrdší tyč se snáze - a tedy i rychleji - narovná a skok tak trvá kratší dobu.

Převýšení

S opuštěním tyče souvisí i převýšení. Jedná se o rozdíl zdolané výšky a výšky úchopu nad zemí. Atleti světové úrovně převyšují okolo 130 cm, ženy okolo 70 cm. Převýšení je jedním z hlavních parametrů, které určují výkonnost atleta. Na jeho hodnotu má vliv jak fyzická zdatnost, tak technické provedení skoku.

1.2 Zpracování obrazu

1.2.1 Detekce člověka

1.2.2 Tracker

1.2.3 Detekce kostry

2. Realizace

2.1 Návrh řešení

2.1.1 Zpracování videa

Ke zpracování videa využiji třídu `cv::VideoCapture`, která otevře video a uloží jednotlivé snímky videa. Následně budu zpracovávat video prostřednictvím těchto snímků, aby video nebylo otevřené příliš dlouho.

2.1.2 Nalezení atletova těla ve videu

Prvním krokem k analýze videozáznamu je nalezení pozice atletova těla ve videu. Pro její určení stačí znát pozici ohraničujícího rámečku atletova těla ve snímku, v němž je poprvé vidět. Může se stát, že v prvním snímku videa atlet vidět není, a tedy je nutné specifikovat i číslo snímku, ve kterém atletův ohraničující rámeček znám.

K získání těchto informací lze přistoupit dvěma metodami. První z nich je manuální zadání ohraničujícího rámečku uživatelem. Pro jednoduchost práce s programem je vhodné použít grafické rozhraní, které dovolí uživateli definovat rámeček pohybem myši po snímku videa. K tomuto účelu se výborně hodí metoda `cv::selectROI`.

Druhou metodou nalezení atletovy pozice ve videu je automatická detekce. K její realizaci nejprve detekuji ohraničující rámečky postav ve snímku videa a následně budu sledovat jejich pohyb.

Pro detekci postav ve snímku lze použít strukturu `cv::HOGDescriptor` a její metodu `detectMultiScale`, která je schopná detekovat několik postav různých velikostí v daném snímku. K detekci postav ve snímku využívá HOG a SVM.

Detekované postavy je potřeba trasovat i v následujících snímcích. K tomu využiji třídu `cv::Tracker`.

Jelikož je mým cílem detekce atleta, stačí sledovat jen postavy, které se hýbou. Pohyb postavy určím podle vzájemného pohybu ohraničujícího rámečku postavy a pozadí snímku. Pohyb pozadí ve videu budu trasovat stejně jako pohyb postav. Vyberu si část pozadí a její pohyb získám s použitím třídy `cv::Tracker`.

Atleta odliším od ostatních pohybujících se postav tak, že provede odraz, tedy se směr jeho pohybu změní směrem vzhůru. Jakmile k odrazu dojde, zapamatuji si číslo snímku, v němž jsem atleta poprvé detekoval, a pozici jeho ohraničujícího rámečku v daném snímku.

2.1.3 Detekce kostry atleta

Pro detekci atletovy kostry využiji natrénovaný model projektu OpenPose¹. Model je natrénovaný na množině MPII Human Pose Dataset (Andriluka a kol., 2014), která obsahuje 25 tisíc obrázků s více než 40 tisíci postavami s anotovanými částmi těla. Množina obsahuje postavy vykonávající 410 aktivit, které jsou u daného obrázku specifikované.

¹<https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose>

Počet částí těla, které model specifikuje je 16, ale poslední z nich je pozadí, které budu ignorovat. Tedy se budu zajímat pouze o prvních 15 částí těla. Jedná se o

0. hlavu,
1. krk,
2. pravé rameno,
3. pravý loket,
4. pravé zápěstí,
5. levé rameno,
6. levý loket,
7. levé zápěstí,
8. pravou kyčel,
9. pravé koleno,
10. pravý kotník
11. levou kyčel,
12. levé koleno,
13. levý kotník a
14. hrudník.

Model následně načtu do hluboké neuronové sítě `cv::dnn::Net` pomocí metody `cv::dnn::readNetFromCaffe`, jelikož je model uložený ve formátu používaného frameworkem Caffe (Jia a kol., 2014).

Abych mohl síti předat obrázek, je nutné ho nejprve překonvertovat metodou `cv::dnn::blobFromImage`. Výsledek této konverze je validní vstup pro síť. Jedná se o čtyřdimenzionální instanci `cv::Mat`, jejíž rozměry jsou

- počet vstupních obrázků,
- počet kanálů vstupních obrázků,
- výška obrázků a
- šířka obrázků.

Výsledná instance `cv::Mat` se následně zpracuje sítí a vydá výstup, což je opět čtyřdimenzionální instance `cv::Mat`, jejíž rozměry jsou

- počet vstupních obrázků,
- počet výstupních parametrů,

- výška výstupů a
- šířka výstupů.

Počet výstupních parametrů je 44, ale budu používat pouze prvních 15, které reprezentují části atletova těla potřebné pro vytvoření kostry. Výslednou hodnotou ve výstupu na dané pozici (i, n, x, y) je pravděpodobnost, že bod na řádku x , ve sloupci y ve výstupu odpovídá části těla n ve vstupním obrázku i . Abych dostal pozici výstupního bodu ve vstupním obrázku, je nutné výstupní souřadnice škálovat poměrem velikostí vstupu a výstupu sítě.

Jelikož se atlet při skoku otáčí a model je natrénovaný na postavách, které otočené nejsou, bude pro lepší přesnost detekce potřeba otáčet také vstupní obrázek. Detekci tedy bude vhodné spouštět na více obrázcích zároveň, což síť umožňuje. Vstupy sítě vytvořím z obrázků metodou `cv::dnn::blobFromImages`, která k tomuto účelu slouží.

2.1.4 Zisk modelu atleta z detekované kostry

2.1.5 Analýza pohybu atletova těla

2.1.6 Zobrazení výstupu analýzy

3. Experimentální část

Závěr

Seznam použité literatury

- ANDRILUKA, M., PISHCHULIN, L., GEHLER, P. a SCHIELE, B. (2014). 2D Human Pose Estimation: New Benchmark and State of the Art Analysis. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- JIA, Y., SHELHAMER, E., DONAHUE, J., KARAYEV, S., LONG, J., GIRSHICK, R., GUADARRAMA, S. a DARRELL, T. (2014). Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. *arXiv preprint arXiv:1408.5093*.

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam použitých zkratek

A. Přílohy

A.1 První příloha