

Biomechanická videoanalýza pohybu

Libor Duchoslav

Učebné texty pre predmet Biomechanická analýza pohybu

Pozn.: najdôležitejšie časti pre potreby študentov sú označené takto.

Úvod

Videografia je v biomechanickom výskume nástupcom kinematografie a v osemdesiatych rokoch ju postupne vytlačala z repertoára biomechanických metodík. V porovnaní s kinematografiou skraca čas od vyhotovenia záznamu po odovzdanie výsledkov a tým vytvára lepšie predpoklady pre spätnoväzbový cyklus v športovej príprave. Poskytuje nové demonštračné možnosti a teda umožňuje názornejšiu prezentáciu výsledkov vedeckého výskumu a odborných štúdií. Znižuje cenovú náročnosť, videografické analyzátory sú lacnejšie, než porovnateľnou kvalitou vybavené kinematografické, spotrebný materiál je tiež niekoľkonásobne lacnejší a opakovateľne použiteľný. Videografia používa širokú škálu zariadení, od sériovo vyrábaných amatérskych komponentov (štandardná videokamera, videorekordér) až po špecializované hitech zariadenia (napr. high speed videokamery) a tým umožňuje vybavenie širokej komunity výskumníkov.

Oblasti použitia videografie sú rôzne, využíva sa v priemyselných aplikáciách a je dominantnou metodikou pre pohybovú analýzu (motion capture), v ktorej sa videografické systémy uplatňujú predovšetkým v športe a v klinickej medicínskej praxi, hlavne na americkom kontinente (motion analysis labs). Je pravdepodobne najrozšírenejším prostriedkom registrácie a analýzy pohybu v športe. Jej aplikácia nevyžaduje žiadne zásahy do priebehu pohybu, je v plnej miere použiteľná pri športových súťažiach.

Rozbor problematiky

Nástup videografie súvisel predovšetkým so štandardným zavedením prvku high speed shutter do sériovo vyrábaných videokamier (27). Bola prekonaná i začiatočná nedôvera k rozlišovacej schopnosti limitovanej počtom riadkov. Pokles cien high speed videorekordérov a kamier v deväťdesiatych rokoch postupne eliminuje jedinú nevýhodu klasickej videografie, ktorou je rigidná a pre niektoré pohybové štruktúry nízka frekvencia záznamu 25/50 fps v systéme PAL (Európa) a 30/60 fps v systéme NTSC (USA, Kanada). High speed videokamery umožňujú záznam frekvenciou 100 a viac fps, špeciálne systémy dokonca 1000 a viac fps. Väčšinou sa však používajú sériové videokamery pracujúce v systéme PAL a NTSC, používajúce štandard VHS a SVHS. Možno konštatovať, že videografia poskytuje z aspektu presnosti rovnocennú alternatívu kinematografii (19).

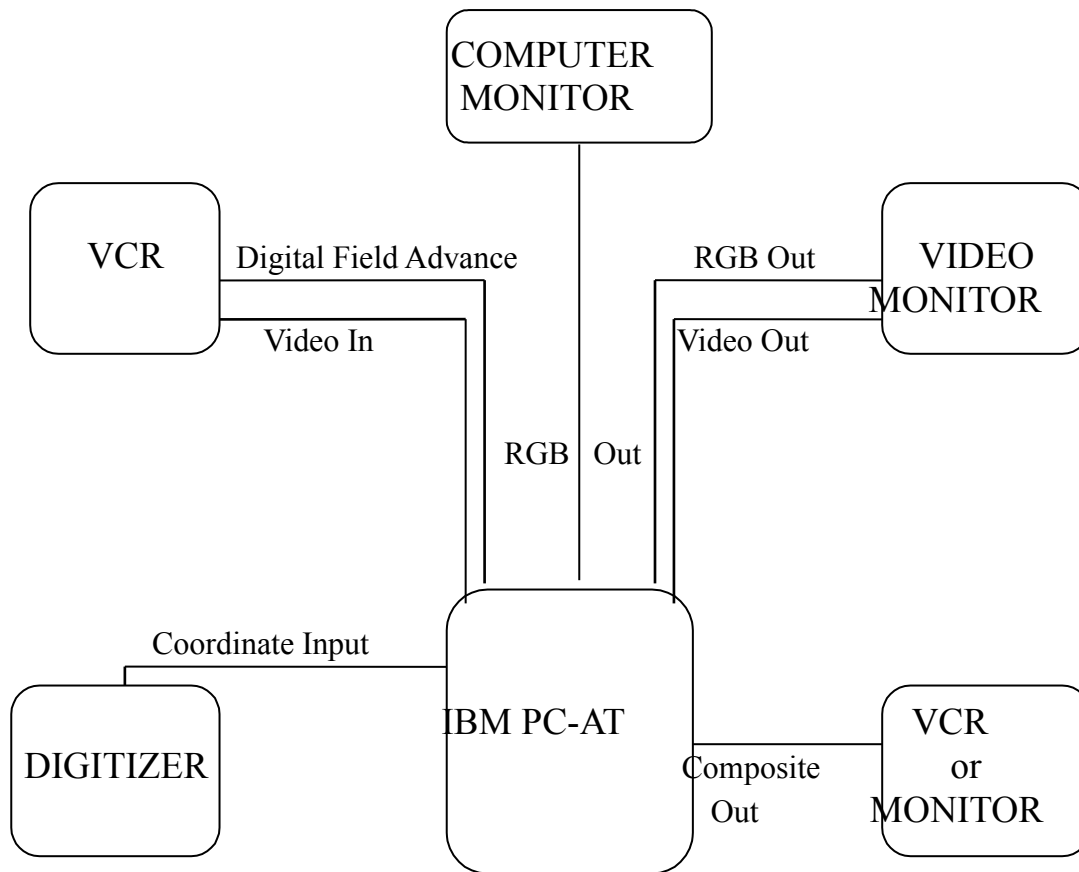
Biomechanický videoanalyzátor je opticko-elektronické zariadenie, ktorého vstupným prvkom je objektív videokamery a výstupným obrazovka počítača alebo tlačiareň.

Videokamera môže byť

1. priamo spojená s videorekordérom (použiteľné v laboratóriu) alebo
2. sa záznam prenesie na nosiči - videokazete - do videorekordéru

Videorekordér slúži na prezeranie analógového videozáznamu a jeho prípravu na formát spracovateľný počítačom, t.j. digitalizáciu. V minulosti bol medzi počítačom a videorekordérom zapojený samostatný digitalizačný komponent slúžiaci na anológovo-digitálny prevod dát, resp. signálu. V súčasnosti túto funkciu plní karta, ktorá je priamo súčasťou hardvéru počítača. Prvá prezentácia videoanalyzátora v dominantnom periodiku športových biomechanikov bola uverejnená až v r. 1987 (27), hoci v tom čase už existovalo viacero systémov vyvinutých buď na univerzitách a slúžiacich pre vlastný výskum konštruktérov systému resp. prvé systémy boli k dispozícii už aj komerčne, príspevok prezentuje systém vyvinutý na University of Kentucky, konfiguráciu systému znázorňuje obr. 1.

Obr. 1. Konfigurácia videoanalyzátora



Videografia v skutočnosti predstavuje tri technicky rozličné prístupy (2, 15):

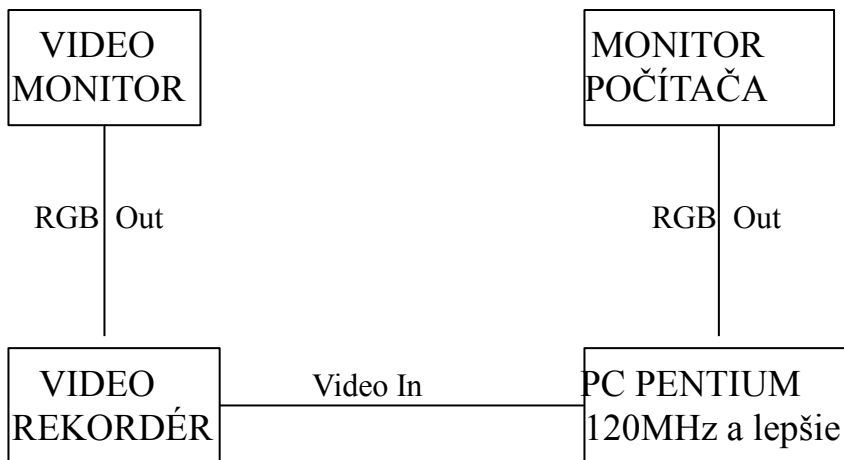
1. "Klasické" systémy - APAS, SIMI, PEAK PERFORMANCE - princípom je manuálna digitalizácia videozáznamu.
2. Systémy používajúce aktívne značky vysielajúce infračervené žiarenie - SELSPOT, CODA, COSTEL.
3. Systémy používajúce pasívne značky odrážajúce infračervené žiarenie emitované diódami v okolí objektívu kamery - QUALYSIS, ELITE, MAC REFLEX, PRIMAS, VICON

Viacero komerčných výrobcov poskytuje systémy používajúce dva alebo všetky tri zo spomenutých technických riešení. Aktualizované informácie o trhu komerčných analyzátorov sú prístupné prostredníctvom Biomechanics Yellow Pages (28), resp. priamo na web serveroch

výrobcov (4, 8, 23, 24, 25, 26, 29). Komplexným portálovým vstupom k biomechanike v širšom zmysle je server Biomechanics World Wide (6), poskytuje aj aktualizované hyperlinky na ďalšie zdroje o problematike videografie (publikácie, softvér, autori), server International Society of Biomechanics in Sports (13) informuje o aktualitách v športovej biomechanike.

Videografické systémy umožňujú dvojdimenzionálnu (2D) alebo trojdimenzionálnu (priestorovú, 3D) analýzu, podľa voľby operátora systému a predpokladajú použitie jednej (pri 2D analýze), dvoch (minimálny predpoklad pri 3D analýze) a viacerých kamier. 3D analýza je rozšírením 2D, používa sa pri nej DLT transformácia dát (1). V našej výuke sa budeme zaoberať 2D analýzou na "klasickom" systéme pracujúcom na základe manuálnej digitalizácie antropometrických bodov. Konfigurácia systému je znázornená na obr. 2

Obr. 2: Konfigurácia videonalyzátora FTVŠ UK Bratislava



Pri digitalizácii sa preferuje sa taký postup, pri ktorom sa jednotlivé snímky prenášajú (grabujú) priamo na pevný disk počítača, kde sú trvalo alebo dočasne uložené v digitálnom formáte. Na týchto snímkoch sa potom kurzorom označujú antropometrické body na tele športovca, z ktorých sa softvérovo rekonštruje model pohybu vo forme paličkového diagramu (stick picture, stick figure). Paličkový diagram je najčastejšie používané modelové znázornenie pri pohybovej analýze, ktoré:

1. redukuje originálny pohyb len na znaky potrebné pre biomechanickú analýzu
2. umožňuje demonštráciu priebehu pohybu.

Náš systém tiež pracuje podľa uvedeného postupu. Digitalizuje sa 19 antropometrických bodov, poloha každého je reprezentovaná dvojicou číselných súradníc. Jedna pohybová sekvencia je prevedená do *.txt súboru, ktorého príklad uvádzame:

1. Pravá špička 342,1753
2. Pravá päta 513,1784
3. Pravý členok 537,1732
4. Pravé koleno 708,1488
5. Pravé bedro 908,1421
6. Ľavé bedro 1046,1426
7. Ľavé koleno 1010,1789
8. Ľavý členok 997,2137
9. Ľavá päta 1002,2178
10. Ľavá špička 989,2344
11. Pravá dlaň 635,752
12. Pravé zápästie 647,803
13. Pravý lakeť 647,1001
14. Pravé rameno 879,1011
15. Ľavé rameno 1042,995
16. Ľavý lakeť 867,923
17. Ľavé zápästie 757,871
18. Ľavá dlaň 745,824
19. Hlava 965,871

Názvy jednotlivých antropometrických bodov a ich číselné poradie boli doplnené manuálne autorom tejto práce, v skutočnosti nie sú v súbore obsiahnuté. Body sú pri ďalšom softvérovom spracovaní identifikované na základe ich jednoznačného poradia určeného pri digitalizácii,

oddeľovacím znakom jednotlivých dvojíc v plain *.txt súbore je tvrdé ukončenie reťazca (ENTER). Lokalizáciu bodov určuje operátor systému položením kurzoru na miesto, ktoré podľa neho je miestom priemetu antropometrického bodu do roviny zobrazenej digitalizovaným obrazom pohybovej sekvencie. Pohybové sekvencie sú jednotlivé okamihy pohybu zaznamenané videokamerou a potom grabované (digitalizované) do *.bmp súborov a dočasne alebo trvalo uložené na pevnom disku počítača. Digitalizáciou teda rozumieme

1. prevod analógového záznamu na magnetickom nosiči - videokazete - do digitálneho grafického formátu, v našom prípade do bitmapového súboru (*.bmp)
2. priradenie digitálnych súradníc vyšetrovaným bodom, v našom prípade je to 19 antropometrických bodov, ak by sme skúmali pohyb náčinia, pribudnú ďalšie body.

Po digitalizácii je možné prezentovať paličkový diagram. Paličkový diagram je výsledkom softvérovej kalkulácie, ktorej vstupom sú prvotné alebo druhotné (filtrované) dáta.

Prvotné dáta (raw data) sú tvorené sériou dvojícou číselných hodnôt reprezentujúcich polohu vyšetrovaného bodu na monitore. Z týchto dát sa softvérovo počítajú biomechanické charakteristiky. Pri opakovanom získavaní dát z rovnakej situácie tým istým operátorom vznikajú (intraindividuálne) rozdiely, rôzni operátori takisto získajú (interindividuálne) rozdielne dáta. V oboch prípadoch sa vypočítané charakteristiky odlišujú od objektívnych charakteristík. Potvrdenie alebo nepotvrdenie štatistickej významnosti týchto rozdielov je mnohokrát irelevantné, dáta treba posudzovať kazuisticky, nie iba štatisticky, keďže aj jediný rozdiel (ktorý by nestačil na potvrdenie štatistickej významnosti) v niektorej základnej charakteristike môže spôsobiť významnú chybu, keďže charakteristiky sú premennými v ďalších biomechanických kalkuláciách. Všetky softvérové kalkulácie sú robené z primárnych premenných, ktorými sú fyzikálne veličiny dĺžka, hmotnosť a čas.

Určením vyšetrovaných bodov sa z fyzikálneho hľadiska vlastne stanovuje fyzikálna veličina dĺžka, vzdialenosti medzi dvomi susednými bodmi sú dĺžkou segmentov. Okrem toho sa ako vstupné charakteristiky zadáva cez klávesnicu telesná hmotnosť a telesná výška, z ktorých sú kalkulované hmotnosti jednotlivých segmentov a určované ťažiská segmentov. Treťou veličinou je čas, ktorý uplynie medzi expozíciou dvoch susedných polôh (pohybových sekvencií), je určený

na frekvenciu záznamu, v prípade klasického videozáznamu v systéme PAL je frekvencia 50 fps, resp. 25 fps.

Filtrované dáta sa počítajú z prvotných dát, cieľom filtrácie je vyhladiť (smooth) nepresnosti spôsobené operátorom systému, resp. interpoláciou vypočítať polohu bodov, v pohybových sekvenciách, ktoré neboli zaznamenané. Najčastejšou príčinou absencie týchto bodov je nízka frekvencia záznamu, ktorej dôsledkom môže byť napríklad chýbajúci okamih určujúci ďalší priebeh pohybu (napr. okamih ukončenia odrazu, ktorý je potrebný pre výpočet charakteristik šikmého vrhu ťažiska). Na biomechanickom analyzátore, na ktorom pracujeme, sa filtrácia vykonáva metódou kľzavých priemerov. Komerčné systémy umožňujú väčšinou voľbu medzi viacerými metódami filtrácie, najčastejšie sa používa:

1. metóda najmenších štvorcov - polynomická filtrácia n -tého rádu
2. použitie kubických a kvintických spline funkcií
3. digitálne filtre, ktoré odstraňujú šumové dáta nad zvolenou cutoff frekvenciou

Okrem toho je špecifickým druhom filtrácie nevyhnutná interpolácia. Predpokladá sa pri nej linearita (5) medzi susednými dátami, resp. dátovými súbormi, ktoré reprezentujú susedné sekvencie pohybu. Interpolácia je častokrát potrebná, nevyhnutná je, ak treba uvažovať o škálovaní časových premenných v intervale 0,01 s, pričom frekvencia videozáznamu je len 50 fps, t.j. časové intervaly sú 0,02 s, v prípade amerických systémov NTSC (frekvencia 60 fps) je interpolácia potrebná vždy (3).

Nepresnosť prvotných i druhotných dát a z nich počítaných veličín spôsobuje rozdiely medzi vypočítanými a skutočnými hodnotami. Vzniknuté chyby budeme považovať za

1. systémové - spôsobené hardvérom a softvérom (algoritmickými modelmi, ktoré nemôžu dokonale simulovať originálne stavy, napr. výpočet ťažiska tela)
2. subjektívne - spôsobené operátorom.

Nie vždy je možné jednoznačne oddeliť systémové chyby od subjektívnych. Rozlišovacia schopnosť systému ovplyvňuje subjektívne chyby. Je určená kvalitou digitalizačného a grafického

modulu (ktorý je súčasťou hardveru počítača) a monitoru počítača. Je pravdepodobné, že rozdielna rozlišovacia schopnosť produkuje rozličnú subjektívnu chybu u tých istých subjektov, t.j. rozdielne analyzátory vytvárajú predpoklady pre rozdielne subjektívne chyby, špecifické pre konkrétny analyzátor.

Inak ako my charakterizujú príčiny chýb pri analýze pohybu iní autori (15,9), zdrojmi chýb sú:

1. pohyb značiek na segmente vzhľadom k osiam rotácie
2. deformácia záznamu pohybu vplyvom optického systému kamery
3. pohyb kamery
4. kvalita záznamového média
5. umiestnenie kamery vzhľadom k rovine pohybu
6. pohyb subjektu mimo vymedzenú rovinu
7. rozlišovacia schopnosť systému
8. nepravidelný posun pásky
9. zoradenie obrázkov počas analýzy
10. chyby pri vyhodnotení spôsobené činnosťou vyhodnocovateľa

Pri niektorých analýzach pristupuje operátor k výskumu tak, že analyzátor považuje za čiernu skrinku a nezaobrá sa procesmi, ktoré vedú k finálnym dátam. Takýto prístup môže byť dostatočný len v ojedinelých prípadoch pri veľmi jednoduchých analýzach pre potreby demonštrácie pohybu paličkovým diagramom, keď nezáleží na presnosti dát a veľkosti chyby.

V literatúre sa stretávame s rôznymi štúdiami, ktoré sa zaoberajú presnosťou videoanalýz (14, 17, 20,31, okrem tých, ktoré citujeme inde). Prístupy k zisťovaniu presnosti porovnávajú najčastejšie

1. fyzikálnym meraním zistenú dĺžku úsečiek s vypočítanou dĺžkou
2. rozptylenosť hodnôt vypočítaných charakteristík zistených opakovanými meraniami, ktoré vykoná jeden operátor a viacerí operátori.

Okrem statickej presnosti sa zisťuje i presnosť dynamická, pri ktorej je výhodné využiť objektívne hodnotiteľný fyzikálny jav akým je voľný pád a veličiny, ktoré ho popisujú (10).

Porovnávaním dĺžky úsečiek sa stanovuje veľkosť chyby, ktorá je platná len pre analýzu statických objektov ohraničených úsečkami s jasne viditeľnými koncovými bodmi. Takto zistená chyba v žiadnom prípade nie je identická s chybou merania pri konkrétnom športovom pohybe, keď sa určujú antropometrické body.

Pre presné určenie jednotlivých bodov na tele športovca je nevyhnutné poznať (16):

- anatómiu ľudského tela
- priebeh pohybu
- vplyv výstroja a výzbroje
- spôsob spracovania záznamu pohybovej sekvencie

Možno konštatovať, že chyba zistená porovnávaním dĺžky úsečiek bude vždy menšia ako chyba pri analýze pohybu. Je spôsobená predovšetkým nepresnosťou hardveru, len čiastočne subjektívnou nepresnosťou operátora, ktorá sa dá v tomto prípade takmer úplne eliminovať, keďže uvažujeme len o statickej analýze jednoznačne určených geometrických tvarov definovaných koncovými bodmi úsečiek. Týmto spôsobom zistíme systémovú chybu, ktorou je zaťažená akákoľvek analýza robená na zariadení. Stačí určiť túto chybu raz, samozrejme toto zistenie musí byť validné.

Pri analýze pohybu je nevyhnutné vysloviť výrok o miere nepresnosti na základe porovnania vypočítaných charakteristík s charakteristikami zistenými inou (objektívnou) metodikou, napr. priamym a nezávislým meraním rýchlosti pohybu alebo využitím či vložením ďalšieho pohybového prvku známych parametrov do záberu analyzovanej činnosti (napr. voľne padajúce teleso). Výpovedne kvalitným postupom je samozrejme porovnanie vypočítaných charakteristík s charakteristikami, ktoré sa vypočítajú zo známych mechanických zákonitostí a za premenné sa dosadia hodnoty vypočítané.

Chyby vypočítaných charakteristík sa vyjadrujú v absolútnych a relatívnych hodnotách. Absolútna chyba je určená číselnou hodnotou, ktorej rozmer je príslušná fyzikálna veličina. V literatúre sú väčšinou uvádzané chyby dĺžky vypočítaných úsečiek, zistené rozdielom medzi vypočítanou a nameranou dĺžkou, ich veľkosť závisí od veľkosti dĺžky. Relatívne vyjadrenie týchto chýb je rozdiel medzi vypočítanou a nameranou dĺžkou vyjadrený percentami z nameranej dĺžky (15) :

1. absolútna chyba: $dX=X-X'$

2. relatívna chyba (v %): $\delta=dX/X=1-X'/X$

kde X je skutočná hodnota a X' je hodnota nameraná.

Vyjadrenie chýb dĺžkových charakteristík neznamená automaticky kvantifikáciu akýchkoľvek chýb. Dĺžky sú v biomechanických kalkuláciách sčítavané, násobené a derivované. Relatívna chyba sa tým síce nemení, ale absolútna chyba rastie. Na základe biomechanických charakteristík sa popisuje technika pohybu a hodnotí úroveň technickej pripravenosti športovca. Korelovaním biomechanických charakteristík s úrovňou športového výkonu sa určuje podmienenosť športového výkonu faktormi techniky. Akákoľvek chyba sa prejavuje neadekvátnym zastúpením jednotlivých faktorov techniky v štruktúre športového výkonu, pedagogické závery vyvedené z nej sú potom prakticky nepoužiteľné alebo použiteľné len v obmedzenej miere. Všeobecne platnú chybu pre všetky prípady pohybovej analýzy nie je možné kvantifikovať (18).

Autori, ktorí riešia otázky kvantifikácie chýb a určenia spoľahlivosti a objektivity systémov (7, 21, 22, 27) uvádzajú väčšinou relatívne chyby do 1% . Výsledky ich zistení potvrdzujú špecifickosť chýb pre konkrétne prípady pohybovej analýzy a konkrétne systémy. Materiály k tejto problematike sú vystavené v archíve konferencie biomch-I (12) a prístupné prostredníctvom prehľadávania kľúčovými slovami video, video analysis, accuracy, error.

Keďže nemožno prijať záver o všeobecne platnej chybe, ktorá sa vzťahuje ku všetkým pohybovým analýzám a ku všetkým systémom pre analýzu je potrebné vždy kvantifikovať

príslušnú relatívnu a absolútnu chybu pre každú z finálnych charakteristík vyšetrovanej pohybovej štruktúry a pre každú špecifickú analýzu.

Literatúra

1. Abdel-Aziz, Y.I. - Karara, H.M.: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: ASP Symposium on Close Range Photogrammetry. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry, 1971.
2. Allard, P. - Stokes, A.F. - Blanche J.P.: Three Dimensional Analysis of Human Movement. Ist Ed., Champaign, Human Kinetics, 1995.
3. Avila, A. : APAS. <http://www.bme.ccf.org/isb/biomch-l/archives/log9511/00046.html>
4. Ariel Dynamics. <http://www.arielnet.com>
5. Ariel Performance Analysis System User's Manual. Kópia dokumentu z archívu autora.
6. Biomechanics World Wide. <http://www.per.ualberta.ca/biomechanics/>
7. Bate, P. - Hoffmann, E.: Accuracy of the Peak Motion Measurement System. In: Proceedings of the XIVth International Society of Biomechanics in Sports. Paris, 1993, p. 156-157.
8. BTS home page. <http://www.bts.it/bts/>
9. Dainty, D.A. - Norman, R.W.: Standardizing Biomechanical Testing in Sport. Ist Ed. Champaign, Human Kinetics, 1987.

10. Ferrigno, D. - D'Amico, M.: The assesment of first and second derivation from noisy kinematic data. Book of Abstracts XIIIth International Congress on Biomechanics, 1991, p. 75-76.
11. Hopkins, W.: A New View of Statistics. <http://www.sportsci.org>
12. ISB WWW server. <http://www.bme.ccf.org/isb>
13. ISBS - Homepage. <http://www.uni-stuttgart.de/External/isbs/>
14. Janura, M.: K metodologickým otázkám při záznamu a vyhodnocení dat pomocí kinematografické vyšetřovací metody. Referát na 2. vedeckej konferencii študentov PGŠ. Bratislava, 1995.
15. Janura, M. - Vaverka , F.: Hodnocení systému pro analýzu videozáznamu I. Přesnost vyhodnocených dat. Tel. Vých. Šport, 7, 1997, č. 3, s. 28-31.
16. Janura, M. - Vaverka , F. - Elfmark, M.: Hodnocení systému pro analýzu videozáznamu II. (Stabilita a objektivita vyhodnocených dat). Tel. Vých. Šport, 7, 1997, č. 4, s. 7-11.
17. Janura, M. - Vaverka, F.: To the Objectivity of the Kinematic Data Obtained from Kinematic Analysis of the Movement. In: A. Barabas, Gy. Fábíán (Eds) Proceedings of the XIIth International Symposium on Biomechanics in Sports, Budapest, Hungarian University of Physical Education 1994, s. 292- 295.
18. Jonkers, I.: Príspevok v konferencii biomch-I. In: Alexander, T.: Summary of motion capture systems. <http://www.bme.ccf.org/isb/biomch-I/archives/log9511/00021.html> (súbor capture)

19. Kennedy, P.W. - Wright, D.L. - Smith, G.A.: Comparison of Film and Video Techniques for Three-dimensional DLT Repredictions. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1989, 5, 457 - 460.
20. Kerwin, D.G. - Mayberry, A.C.: Video Digitizing Accuracy. *Journal of Sport Sciences*, 1994, 12 (2), p. 171 - 172.
21. Klein, P.J. - De Haven, J.J.: Accuracy of Three Dimensional Linear and Angular Estimates Obtained with the Ariel Performance Analysis System. *American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1995, 76, p.183-189.
22. Levy, M. - Smith, G.A.: Validation of Mac Reflex Motion Analysis System for Three-dimensional Coordinate Prediction. In: Häkkinen, K.L. - Keskinen, P.V. - Komi A., Mero (Eds.): *Xvth Congress of the International Society of Biomechanics, Book of Abstracts*, Gummerus Printing, Finland, 1995, p. 936-937.
23. Mikromak. <http://www.mikromak.com/english/products/products.html>
24. Motion Analysis Corporation. <http://www.motionanalysis.com/>
25. Peak Performance Technologies. <http://www.peakperform.com/>
26. Qualisys Homepage. <http://www.qualisys.com/>
27. Shapiro, R. - Blow, Ch. - Rash, G.: Video Digitizing Analysis System. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1987, 3, p. 80-86.
28. The Biomechanics Yellow Pages. <http://members.aol.com/BiomechYP/>
29. Welcome to Vicon Motion Capture. <http://www.vicon.com/>

30. Wisner, D.M.: Determination of the Precision, Accuracy and Resolution of a Video-based Motion Analysis System. M.S. Purdue University, 1992.

31. Yelland, J: Príspevok v konferencii biomch-l. In: Leva, P.: SUMMARY: Videorecording speed variability. <http://www.bme.ccf.org/isb/biomch-l/archives/log9412/00100.html>