

---

Slovenská technická univerzita v Bratislave

**FAKULTA INFORMATIKY A INFORMAČNÝCH TECHNOLOGIÍ**

Ilkovičova 3, 842 16 Bratislava 4

---

## **System pre analýzu a animáciu chôdze človeka**

### **Dokumentácia**

---

Vedúci projektu: doc. Ing. Martin Šperka, PhD.

Október, 2005

Tím č. 5 :

Bc. Blanárik Ivan

Bc. Kočiš Ladislav

Bc. Kotrba Attila

Bc. Kročka Lukáš

Bc. Lenický Mário

---

## Zadanie

Analyzujte problematiku animácie pohybu dolných končatín človeka pri chôdzi z nasnímaných polôh kĺbov pomocou video kamery. S použitím výsledkov tímového projektu [1] a [2] z roku 2003/2004 a 2004/5 použite spôsob reprezentácie kostry končatín a ich animácie. Sústreďte sa hlavne na snímanie pohybu pomocou viac kamier, synchronizácie videosekvencií, získania súradníc kĺbov, ich transformovanie do animačného pod systému a 3D animácie.

Na základe analýzy modifikujte a doplňte existujúci systém pre nasledovné činnosti:

- zosnímanie pohybu pomocou video kamery, pričom jednotlivé kĺby sú označené kontrastnými značkami. Overte použitie LED diód a filtrov z predchádzajúceho projektu, experimentujte a vylepšite kontrast kombináciou rôznych farieb LED a filtrov
- zlepšite digitalizáciu video sekvencií, rozloženie na jednotlivé snímky, predspracovanie a segmentácia obrazu, určenie súradníc kĺbov v 3D (použijú sa dve kamery alebo obraz z dvoch priemetov) z dvoch na seba kolmých kamier
- odvodenie vzťahov pre výpočet súradníc kĺbov pre prípad, ak pohľady kamier nie sú na seba kolmé pomocou epipolárnej geometrie
- transformácia súradníc kĺbov do formátu animačného systému
- vytvorenie niekoľkých animácií z nameraných dát (s použitím pod systému vytvoreného v predchádzajúcom projekte)
- analýza animácie z nameraných výsledkov
- zhrnutie dosiahnutých výsledkov vo forme článku na medzinárodnú vedeckú konferenciu (v angličtine)

Odporúčaná literatúra:

1. Marešák, J., Matuška, M., Petreje, J., Sás, I.: Animácia a vizuálna analýza chôdze človeka. Tímový projekt FIIT STU, Bratislava 2004.
2. Lučenič, Ľ. A kol., Animácia a vizuálna analýza chôdze človeka. Tímový projekt FIIT STU, Bratislava 2005.
3. K. Tsutsuguchi , Y. Suenaga , Y. Watanabe , K. Shimohara: Human Walking Animation System in Three-dimensional Modeled Scene  
<http://www.ipsj.or.jp/members/Journal/Eng/3804/article013.html>
4. Bipedal Human Gait : A 3d Interactive Model with Animation:  
[http://www.frontiernet.net/~imaging/gait\\_model.html](http://www.frontiernet.net/~imaging/gait_model.html)

5. Amr A. Awadallah: A Hierarchical Kinematic-Dynamic Approach for the Graphical Animation of Human Figure Walking", Master's Thesis  
<http://klamath.stanford.edu/~aaa/human.html>
6. A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture: Journal: Computer Vision and Image Understanding: CVIU,  
<http://citeseer.nj.nec.com/moeslund01survey.htm>
7. K.R. Kaufman: Future Directions in Gait Analysis.  
<http://www.vard.org/mono/gait/kaufman.htm>

# Obsah

<b>0</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
0.1	Použitá literatúra	1
<b>1</b>	<b>Špecifikácia požiadaviek</b>	<b>3</b>
1.1	Proces vytvorenia animácie	3
1.1.1	Zosnímanie chôdze viacerými kamerami	4
1.1.2	Synchronizácia kamier	4
1.1.3	Digitalizácia videozáznamu	4
1.1.4	Zistenie polohy kĺbov	4
1.1.5	Vypočítanie 3D súradníc polohy kĺbov	5
1.1.6	Transformácia 3D súradníc do formátu súboru animačného programu	5
1.1.7	Animácia pohybu spodnej časti ľudskej kostry	5
<b>2</b>	<b>Analýza</b>	<b>6</b>
2.1	Analýza existujúcich riešení	6
2.1.1	APAS/Gait	6
2.1.2	The motion monitor	8
2.1.3	Kinemetrix motion analysis system	9
2.1.4	Záver analýzy existujúcich riešení	11
2.2	Analýza súčasného stavu projektu	12
2.2.1	Analýza vytvorených programov	12
2.2.2	Záver analýzy súčasného stavu projektu	16
2.3	Značková analýza (Marker Analysis)	16
2.3.1	Aktívne a pasívne značky	16
2.3.2	Umiestnenie značiek na povrchu tela	17
2.3.3	Aktívne značky s použitím LED	17
2.3.4	Pasívne značky v oblasti infračerveného svetla	18
2.4	Epipolárna geometria	19
2.4.1	Geometrický model	21
2.4.2	Základné vzťahy v epipolárnej geometrii	22
2.4.3	Určovanie fundamentálnej matice	23
2.5	Úprava scény	24
2.5.1	Rozmiestnenie kamier	25
2.5.2	Kontrast medzi objektami a pozadím	25

2.5.3	Osvetlenie scény .....	26
2.6	Predspracovanie obrazu .....	28
2.6.1	Ekvalizácia (vyrovnanie) histogramu .....	28
2.6.2	Filtrácia šumu (lokálne predspracovanie) .....	29
2.6.3	Obyčajné spriemerovanie .....	29
2.6.4	Ďalšie metódy filtrácie .....	30
2.7	Segmentácia .....	30
2.7.1	Histogram .....	31
2.7.2	Prahovanie .....	31
2.7.3	Globálne prahovanie .....	32
2.7.4	Poloprahovanie .....	32
2.7.5	Spektrálne prahovanie .....	32
2.7.6	Multispektrálne prahovanie .....	33
2.7.7	Určenie prahovej hodnoty T .....	33
2.7.8	Metódy detekcie hrán .....	33
2.7.9	Metódy segmentácie založené na oblastiach .....	34
2.8	Záver analýzy .....	35
<b>3</b>	<b>Hrubý návrh riešenia .....</b>	<b>36</b>
3.1	Proces analýzy chôdze .....	36
3.2	Systém videokamier .....	36
3.3	Synchronizácia kamier .....	38
3.4	Spracovanie videa .....	38
3.4.1	Prevod na snímky .....	39
3.5	Animácia chôdze .....	40
3.6	Analýza chôdze .....	41

# 0 Úvod

Tímový projekt sa zameriava na oblasť animácie pohybu ľudského tela. V informačných technológiách táto oblasť nie je veľmi rozšírená, aj keď existujú komerčné systémy z danej oblasti, ktoré sú ale nedostupné a veľmi drahé. Náš tímový projekt sa zaoberá konkrétne analýzou chôdze človeka a jej vizualizáciou.

Táto oblasť, a konkrétne aj tento projekt zahŕňa mnoho rôznych procesov, ktoré treba riešiť. V prvom rade je to získanie obrazových údajov, z ktorých sa vykonáva analýza, tiež problém ich digitalizácie a rozlíšenia, ako získať požadované údaje, ktoré nám umožnia zobrazit' dynamický pohyb ľudskej nohy v špeciálnom na to určenom softvéri. Taktiež konštrukcia tohto softvéru nieje triviálna a vyžaduje veľa úsilia od riešiteľov projektu. Projektov z danej oblasti nieje veľa, preto sa snažíme vymyslieť čo najlepšie a z hľadiska celkových nákladov aj prijateľné riešenie, v danej oblasti neexistujú štandardy, z ktorých by bolo na prvý pohľad jasné, ako sa bude riešiť tento projekt, preto veľká časť úloh bude výskumného charakteru, a hlavnou činnosťou bude vymyslieť čo najlepšie riešenie.

Tento projekt je riešený pre výskumné účely v danej oblasti analýzy a vizualizácie pohybu ľudskej nohy, projekt sa rieši pre lekára, ktorý je odborníkom v danej oblasti.

Projekt bol riešený viac či menej úspešne už dvoma predchádzajúcimi tímami, tímom „Stopári“ a tímom „Five fit feet of FIIT“. Našou úlohou v projekte je dotiahnuť ho do podoby, aby bola celá súprava softvéru a zariadení použiteľná v praxi, tj. v lekárskej praxi doktora, a mohla sa využívať na analýzu porúch chôdze.

## 0.1 Použitá literatúra

[1] <http://www.sportsci.com/adi2001/adi/services/support/manuals/gait/markersets.asp>

[2] <http://www.innsport.com/>

[3] <http://www.mie-uk.com/kin/>

[4]

<http://www.laboratorium.dist.unige.it/~piero/Teaching/Gait/BONTRAGER%20Instrumented%20Gait%20Analysis%20Systems.htm>

- [5] Borghese N. A., Cerveri P. - Calibrating a video camera pair with a rigid. 1999  
[http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/References/Papers/00\\_SelfCal\\_PattRecogn.pdf](http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/References/Papers/00_SelfCal_PattRecogn.pdf)
- [6] Dařílková K. – Modelovanie 3D objektov z fotografie. 2004  
<http://fractal.dam.fmph.uniba.sk/~darilkova/RigoroznaPracaFINE.pdf>
- [7] Zhang Z. - Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review. 1996  
<http://graphics.cs.msu.su/library/publications/determ.pdf>
- [8] <http://neuron.tuke.sk/~pluchta/Pocitacove%20Videnie/Prednasky/minimovka.doc>
- [9] <http://fractal.dam.fmph.uniba.sk/~darilkova/RigoroznaPracaFINE.pdf>

# 1 Špecifikácia požiadaviek

Analýza chôdze človeka je sofistikovaná laboratórna technika, ktorá používa modernú elektroniku na analýzu dynamiky pohybu človeka. Slúži pre lekárov, chirurgov a terapeutov pre určenie kvantitatívnych a dynamických hraníc pohybu ľudského tela a jeho končatín. Tiež pomáha lekárom rozhodnúť, čo spôsobuje poruchy pohybu končatín a aký je dôsledok pri kompenzovaní týchto porúch.

Pre chirurgický tím je analýza chôdze človeka užitočná pri rozhodnutiach o aplikácii príslušnej chirurgickej procedúry na nápravu nesprávnej chôdze. Pre chirurgiu je tiež užitočná z hľadiska učenia sa, či bola táto porucha použitím danej procedúry napravená.

Použitím 3D systémov pre analýzu pohybu je možné dosiahnuť [1]:

- Presné meranie odchýlok od normálu
- Zistiť príčiny poruchy chôdze
- Poskytnúť informácie pre lekárov pri robení rozhodnutí o chirurgickom zákroku
- Ohodnotiť dôsledok zákroku na maximalizovanie výsledku
- Porovnať chôdzu pacienta pred a po vykonaní zákroku

Analýza chôdze kombinuje odborné znalosti z ortopédie, biomechaniky a „fyzickej terapie“.

Oblasť nášho projektu sa zameriava na zosnímanie ľudskej chôdze a následné animovanie tohoto pohybu na zmenšenom modeli spodnej časti ľudskej kostry. Projekt má využitie v oblasti medicíny, pri zisťovaní a analýze porúch chôdze.

Celý proces od zosnímania chôdze až po jej animáciu pozostáva z nasledujúcich krokov:

- Zosnímanie chôdze viacerými kamerami
- Synchronizácia kamier
- Digitalizácie videozáznamu
- Zistenie polohy kĺbov
- Vypočítanie 3D súradníc polohy kĺbov
- Transformácia 3D súradníc do formátu súboru animačného programu
- Animácia pohybu spodnej časti ľudskej kostry

## 1.1 Proces vytvorenia animácie

V tejto časti popíšeme podrobne jednotlivé časti procesu vytvorenia animácie podľa krokov uvedených v úvode kapitoly.



### **1.1.1 Zosnímanie chôdze viacerými kamerami**

Videozáznam možno vo všeobecnosti spraviť dvoma typmi kamier, a to digitálnou a analógovou. Záznam spravený analógovou kamerou musíme previesť do digitálneho záznamu A/D prevodníkom, ktorý môže byť umiestnený napr. na televíznej karte v počítači. Spôsoby záznamov a ich prevod analyzovali predchádzajúce tímy spolu s mnohými formátmi záznamov, preto sa tejto časti nebudeme venovať.

### **1.1.2 Synchronizácia kamier**

Je dôležitá lebo kamery sa nedajú spustiť v rovnakom čase a vznikne medzi nimi časová odchylka, ktorá spôsobí desynchronizáciu. Z tohto dôvodu je potrebné navrhnuť mechanizmus, ktorý kamery zosynchronizuje a umožní tak správne spracovať výstupné dáta. Predchádzajúce tímy vyriešili tento problém bleskom v momente, kedy všetky kamery bežali. Snímky zachytené pred bleskom sa zmažú a zvyšné snímky sa použijú pri ďalšom výpočte.

### **1.1.3 Digitalizácia videozáznamu**

Pod digitalizáciou sa rozumie prevod do takého formátu, s ktorým už v počítači možno ďalej pracovať. Výber vhodného formátu je veľmi dôležitý kvôli schopnosti korektne rozoznať polohu kĺbov na jednotlivých snímkoch. S formátom videozáznamu súvisí aj chybovosť rozoznávania snímkov a v neposlednom rade veľkosť, ktorú zaberá videozáznam na disku počítača.

Po zdigitalizovaní videa ho musíme rozdeliť na jednotlivé snímky, z ktorých sa budú určovať súradnice značiek. Rozdelenie na snímky sa zabezpečí funkciami v programovacom jazyku, konkrétne z knižnice MFC. Tiež treba vhodne zvoliť formát snímkov, aby práca s nimi a ich predspracovanie bolo čo najefektívnejšie a vykonávalo sa čo najrýchlejšie.

### **1.1.4 Zistenie polohy kĺbov**

Toto je najdôležitejšia úloha. Rozpoznávanie polohy kĺbov zo snímkov videozáznamu musí byť dostatočne spoľahlivé a efektívne. Predchádzajúce tímy označovali kĺby značkami. Vyskúšali rôzne typy a farby značiek, avšak s malým úspechom. My chceme vyskúšať nový typ, a to reflexné značky. Úlohou bude vytvoriť algoritmus s čo najväčšou úspešnosťou

rozoznávanie značiek. Metóda na zisťovanie polohy značiek zo snímok sa nazýva segmentácia. Bude podrobne popísaná v analýze.

### **1.1.5 Vypočítanie 3D súradníc polohy kĺbov**

3D polohu kĺbov bude treba vypočítať z polohy jednotlivých značiek zachytených viacerými kamerami v tom istom čase. Využije sa tu epipolárna geometria, ktorá nám umožní umiestniť kamery v ľubovoľnom uhle, čo výrazne uľahčí adaptovanie sa na rôzne prostredia.

### **1.1.6 Transformácia 3D súradníc do formátu súboru animačného programu**

Po vypočítaní 3D súradníc polôh kĺbov je potrebné previesť ich do takého formátu, aby ich dokázal animačný program zobrazit'. Na animáciu použijeme program BlueBone, ktorý vytvorili predchádzajúce tímy.

### **1.1.7 Animácia pohybu spodnej časti ľudskej kostry**

Toto je finálna časť projektu. Na animáciu použijeme už vytvorený program BlueBone. Vstupné dáta animácie si načíta zo vstupného súboru, z ktorých vytvorí animáciu. Na animáciu sa použije spodná časť ľudskej kostry.

## 2 Analýza

V tejto časti zanalyzuje súčasný stav projektu a možné prístupy, ktoré sa využívajú vo svete. Toto zadanie má hlavne výskumný charakter, problematika segmentácie obrazu je pomerne komplikovaná. Od času riešenia posledného tímu ubehla pomerne dlhá doba, vo svete riešenie pokročilo, využívajú sa nové prístupy. V tejto časti sa zameriame aj na analýzu najzaujímavejších riešení alebo prístupov. Problematikám synchronizácie kamier a extrakcie snímok z video záznamu sa nebudeme venovať, lebo už boli dostatočne analyzované predchádzajúcimi tímami a už sú vyriešené.

### 2.1 Analýza existujúcich riešení

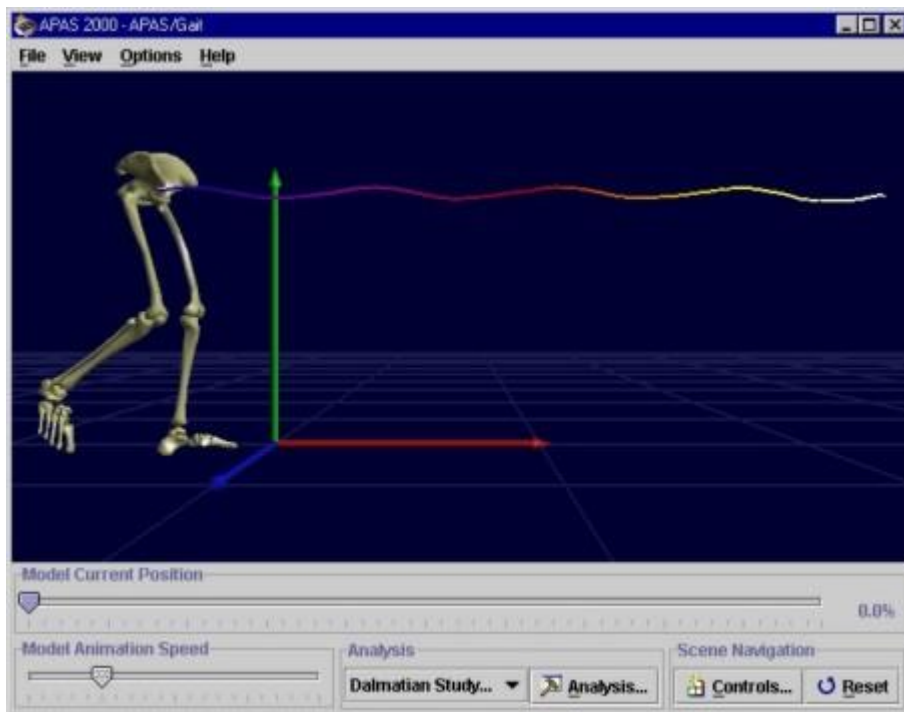
Pri analýze sme sa zamerali aj na pozorovanie a analýzu existujúcich softvérových systémov pre snímanie dynamického pohybu nohy. Predchádzajúce tímy sa tiež venovali tejto problematike. V priebehu dvoch rokov sa v tejto oblasti ale mnoho zmenilo, resp. vylepšilo a existujúci softvér bol vylepšený o nové verzie. V tejto kapitole popíšeme niektoré významné existujúce systémy z oblasti analýzy pohybu ľudského tela, nielen nohy. Popíšeme aj spôsoby, akými zisťovali polohy jednotlivých značiek, ako aj spôsoby animácie, samozrejme podľa dostupných informácií.

#### 2.1.1 APAS/Gait

Tento softvér umožňuje 3D animáciu spodnej časti ľudského tela. Na animáciu použili rôzne množiny značiek [1]. Tieto množiny hovoria o umiestnení značiek na ľudskom tele.

V scéne je možné sa pohybovať použitím myši. Pohybom myši a držaním príslušného tlačidla je možná navigácia v scéne. Tlačidlá myši majú nasledovné efekty:

- Ľavé – otáčanie scény
- Stredné (alebo Alt + Ľavé) – zoom
- Pravé – prekladanie scény

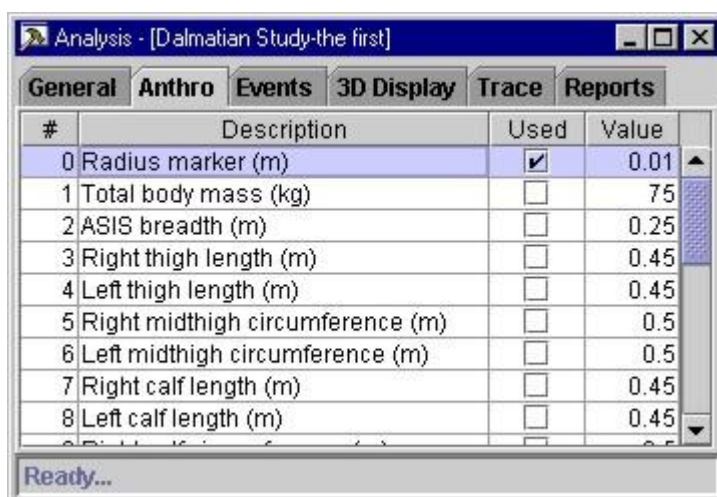


Obr. č. 1 Animácia v APAS/Gait

V programe je možné nastavovať rôzne antropomorfné vzdialenosti a sledovať tak vplyv ich zmeny na výsledok animácie a meraní. Medzi takéto antropomorfné vzdialenosti patrí napríklad polomer značky, dĺžka pravého stehna, dĺžka ľavého stehna a iné.

Okrem toho je možné nastavovať mnoho ďalších vecí, ako je napríklad tzv. „trace mód“.

V tomto móde je možné vybrať konkrétne kĺby (konkrétny členok, koleno, panva alebo bedro) a sledovať tak pohyb tejto časti. Umožňuje tiež vkladať rôzne reporty – komentáre, dátumy a iné.



Obr. č. 2 Nastavenie značiek v APAS/Gait

APAS/Gait používa reflexné značky a svetelné zdroje na zväčšenie kontrastu medzi značkami a pozadím. Svetelné zdroje používajú pre každú kameru zvlášť a smerujú tým istým smerom, ako je uhol pohľadu kamery. Intenzita svetla nemusí byť vysoká. Čím je väčšia táto intenzita, tým má väčší zásah do protiľahlej kamery.

Predchádzajúci tím tiež analyzoval tento systém, avšak asi nemali dostatočne naštudovanú ich web stránku. Niektoré časti ich stránky boli totiž naposledy modifikované v roku 2001, niektoré v roku 2002 ale i v r. 2004. Podľa toho boli prístupné i skôr v takej kvalite, ako je v súčasnosti. Sú tu k dispozícii podrobné tutoriály a manuály k systému. Systém je tiež dostupný k stiahnutiu – 30 dňová trial verzia.

Podrobné hardvérové nároky na systém sú uvedené na adrese

<http://www.sportsci.com/adi2001/adi/services/support/tutorials/gait/chapter3/3.2.asp>.

Požadované hardvérové nároky sú nasledovné:

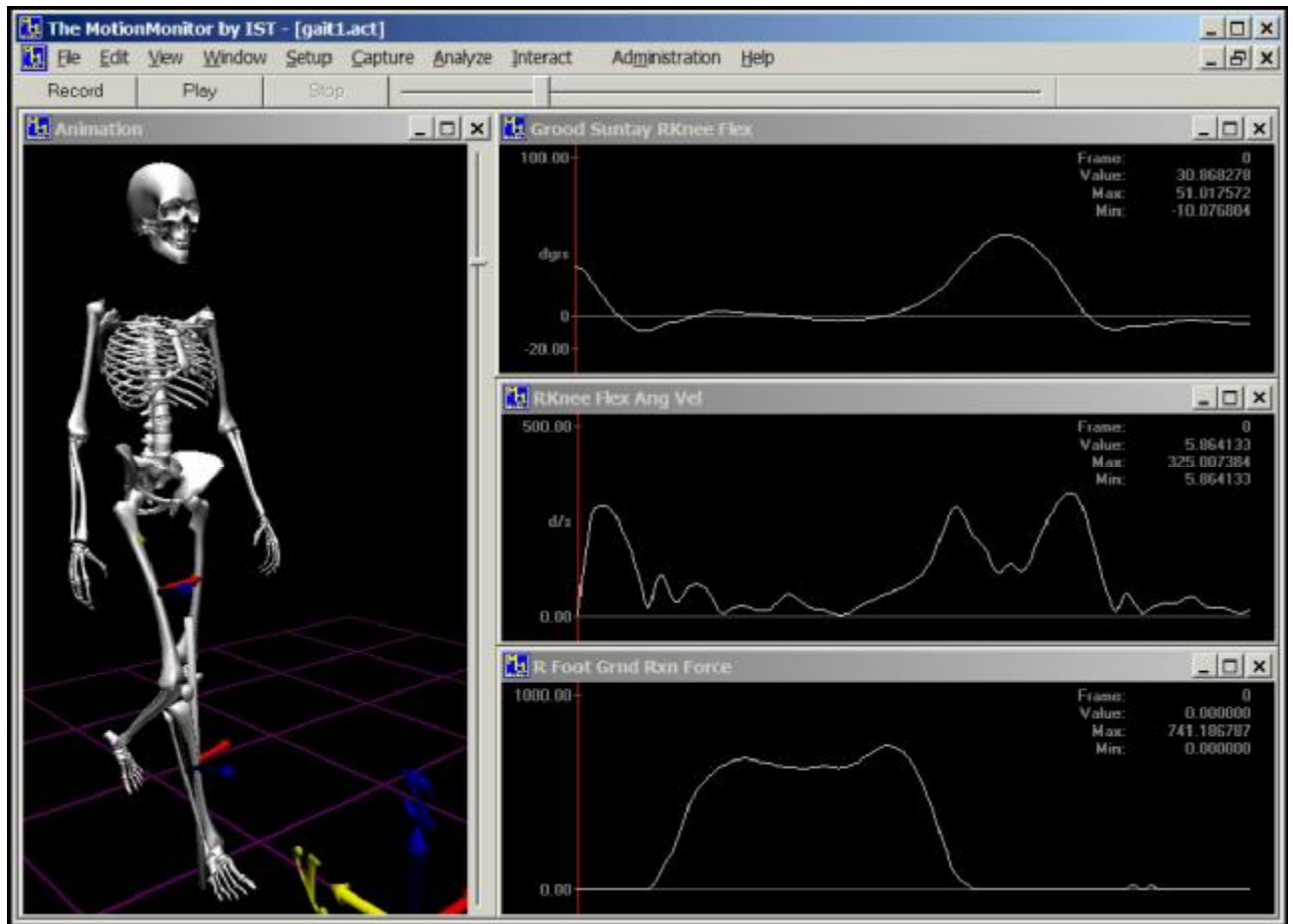
- Jedna video kamera pre 2D analýzu
- Videorekordér (video tape recorder - VCR) pre každú kameru pre 3D analýzu – používajú analógové kamery
- Video kamery s 50 snímkov za sekundu (norma PAL) alebo 60 snímkov za sekundu s použitím genlocku – postačujúce pre chôdzu, avšak použitie viacerých kamier spôsobí dobu expozície väčšiu o 8.3 ms alebo 10 ms (polovica snímku) pre každú kameru.
- „shutter“ (uzávierka) – je použitý pre každú kameru a definuje dobu expozície každého snímku. Bežné hodnoty sú 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000 a môže byť aj 1/10000 sekundy.
- Konvertor analógového videozáznamu na digitálny
- Synchronizácia udalosťou – použitá je LED dióda, ktorá je viditeľná z každej kamery.
- Foto bunky na meranie rýchlosti pohybu.
- Svetlá pre každú kameru.
- Kalibračná kocka – pre 3D analýzu (pre 2D stačia štyri kalibračné body)

Nastavenie uzávierky na 1/500 redukuje pohyb značky umiestnenej na členku na 0,78 cm, čo je pomerne uspokojivé.

## 2.1.2 The motion monitor

Tento softvér vyrobila firma Innovative Sports Training, je určený pre laboratóriá a aplikáciu v medicínskej oblasti. [2] Slúži na presné meranie pohybu ľudského tela, v rôznych aplikáciách, ako autori píšú. Pomocou tohoto softvéru je možno určovať aj silu pôsobiacu nohou, pravdepodobne po zadaní dodatočných parametrov tela osoby. Softvér je komerčného využitia, a je volne neprístupný, preto sme ho teda nemali možnosť odskúšať. Aspoň

uvádzame na obrázku č. 3 vzhľad ich softvéru. Veľkou výhodou softvéru, ako autori tvrdia, je práca real-time bez post-processingu pri analýze pohybu.

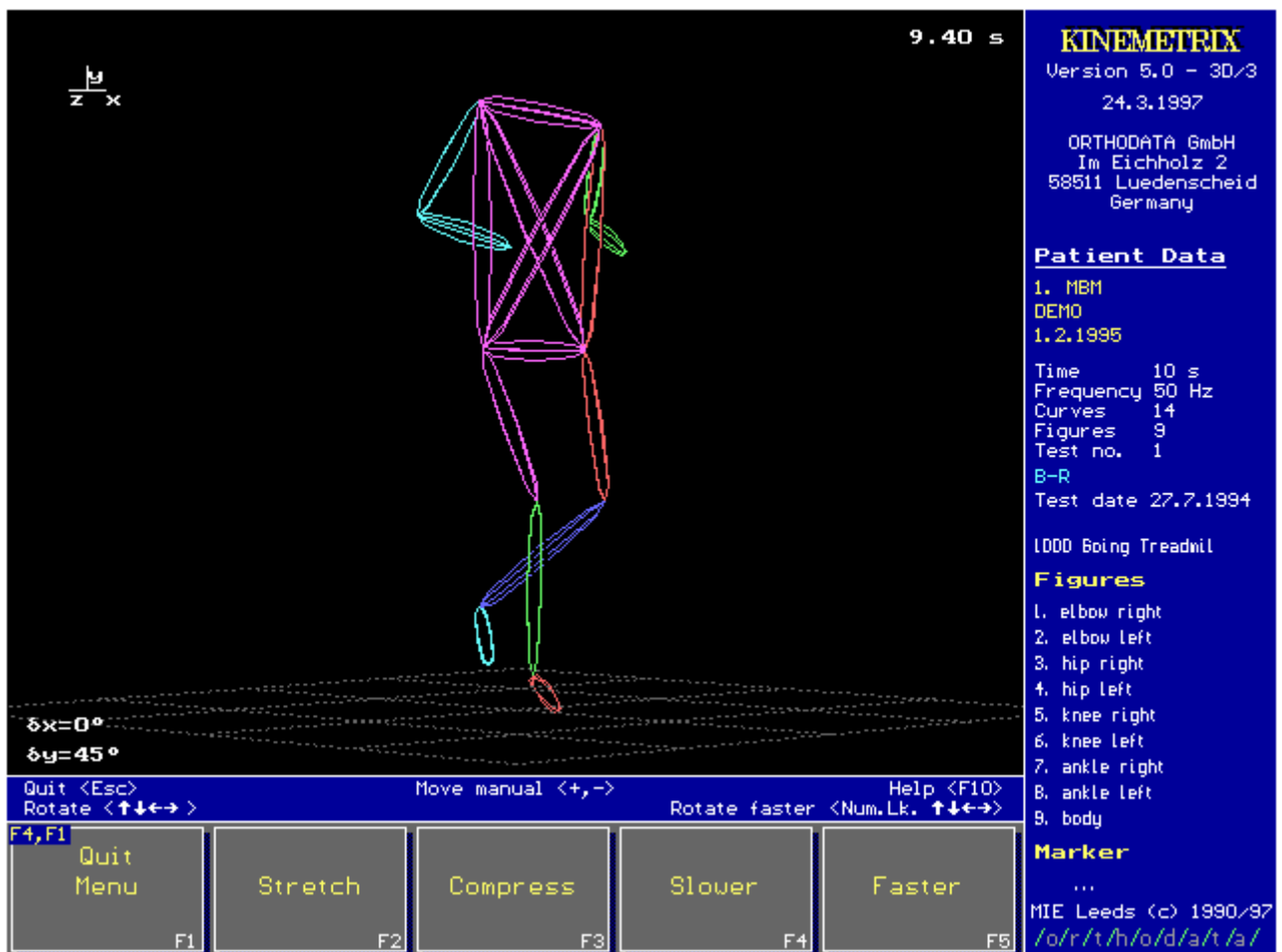


Obr. č. 3 Prostredie softvéru The motion monitor

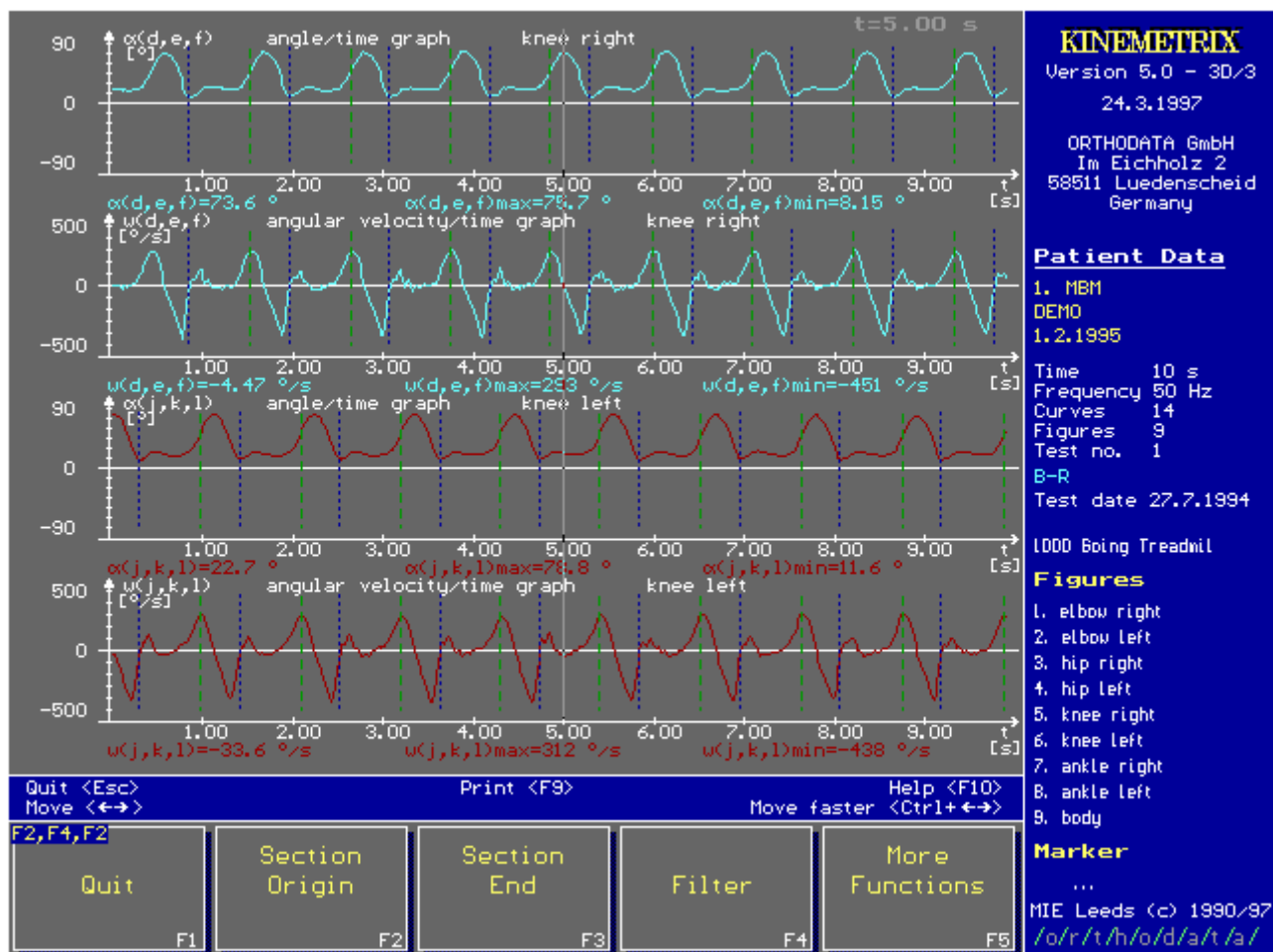
### 2.1.3 Kinemetrix motion analysis system

Kinemetrix je balíček softvéru, ktorý umožňuje pomocou infračervenej technológie analyzovať pohyby ľudského tela pomocou reflexných značiek.[3] Pre spracovanie obrazu sa využíva špeciálna výkonná karta, ktorá spracováva vstupné údaje. Systém používa na analýzu jednoduché reflexné značky, ktoré sa umiestnia na telo človeka. Tento systém vytvára celkovú analýzu pohybu človeka, a teda sa nezameriava len na spodnú časť tela. Autori na stránkach <http://www.mie-uk.com/kin/> uvádzajú rôzne použitia systému, v oblastiach ako pediatria, šport, ergonómika, medicína a priemysel. Softvér umožňuje nastaviť viacero

konfigurácií značiek, maximálne až 100 značiek. Z analyzovaných dát generuje rôzne grafy, umožňuje prezentovať v grafoch aj jednotlivé značky. Systém umožňuje 2D analýzu pomocou jednej kamery, ako aj analýzu 3D pomocou dvoch a viacerých kamier. Pravdepodobne je možné generovať vzťahy medzi značkami manuálne aj počas behu programu, a program potom podľa týchto informácií vytvorí 3D graf. Pohyb tela je možno ľubovoľne otáčať v softvéri. V strohej technickej špecifikácii uvedenej na webe je uvedené, že systém používa kamery CCIR štandardu, čo je 625 riadkov na 576 stĺpcov pixelov. Je možné použiť kamery s 50 alebo 100 snímkami za sekundu. Veľmi zaujímavé sú hardvérové požiadavky na systém. Uvádza sa použitie počítača s procesorom 486DX, 8 MB pamäte a 80 MB Diskovým priestorom. Teda tento systém je implementovaný pod operačným systémom MS-DOS, a vyžaduje verziu MS-DOS 6.0 alebo vyššiu. Práve preto sme názoru, že už rozlišovanie bodov na tele človeka a prevod na 3D súradnice sa vykonáva práve na prídavnej karte do slotu počítača, čo výrazne uľahčuje činnosť vlastného počítača, ale táto informácia na webe nieje uvedená. Ukážka softvéru je na obr.2 a 3.



Obr. č. 4 Obrazovka Kinematrix motion analysis system



Obr. č. 5 Výstupy vo forme grafov v Kinematrix motion analysis system

## 2.1.4 Záver analýzy existujúcich riešení

Vo svete a v niektorých tu uvedených systémoch analyzujú viacej informácií, nielen poruchy chôdze. Niektoré tu uvedené systémy robia viacej typov analýz[4]:

- Časová analýza chôdze (Temporal gait analysis). Pri tomto spôsobe analýzy sa vyhodnocuje rýchlosť a spôsob chôdze človeka, dĺžka kroku a pravidelnosť. Pre analýzu sa používajú tzv. spínače nôh (Footswitches) a špeciálne koberčeky na chôdzu (Gait mats).
- Analýza tlaku (Foot pressure analysis) Tu sa analyzuje tlak ktorým pôsobí končatina na podložku, a rozloženie tohoto tlaku na povrchu končatiny. Používajú sa tlakové koberce (Pressure mats), veľkosti niekoľko metrov štvorcových, ktoré obsahujú senzory. Hustota senzorov je od 1 až po asi 3 senzory na centimeter štvorcový,



z čoho vyplýva aj rozlišovacia schopnosť koberca. Tiež sa môžu použiť tlakové podrážky (Pressure insoles), z ktorých pri chôdzi idú dáta priamo do softvéru.

- Analýza pohybu (Motion analysis) Pri analýze pohybu existuje viacero systémov a spôsobov analýzy, najdôležitejšie sú však použitie electrogoniometrov a video analýza pohybu, ktorú prevádzame aj v našom projekte. Pri použití videoanalýzy existujú všeobecne dva spôsoby, a to značková analýza, a bezznačková analýza (Marker a Markerless analysis). Systémy so značkami rozdeľuje na dva druhy, a to
  - Aktívne (Active marker systems). Tu sa ako značky používajú aktívne prvky, napr. IR diódy, ktoré emitujú svetlo.
  - Pasívne (Passive marker systems). Ako značky sa používajú rôzne pasívne materiály rôznych tvarov, najčastejšie reflexné materiály. Používajú sa dve alebo tri kamery, podľa toho, či chceme 2D alebo 3D analýzu, v 3D analýze v praxi ale treba viac než 3 kamery, z dôvodu, že subjekt môže nohu otáčať, a tak nie sú viditeľné všetky značky, a tiež si môže pomáhať, napr. Podopierať palicou. 2D analýzu jednou kamerou ale stránka neodporúča, pretože môže byť nepresná a mala by sa používať len vo vyhradených situáciách.
- Analýza síl (Force analysis) Používa sa na zisťovanie a analýzu síl pôsobiacich pri pohybe človeka. Používajú sa tzv. silové dosky (Force plates), ktoré sa musia špeciálne namontovať do podlahy. Tiež existujú topánky pre meranie síl (Force measurement sandals).
- Elektromyografia (Electromyography, EMG). EMG je spôsob ako zistiť čo svaly robia pri pohybe človeka. Používa sa hlavne v oblasti medicíny na určovanie a analýzu porúch chôdze,

## 2.2 Analýza súčasného stavu projektu

### 2.2.1 Analýza vytvorených programov

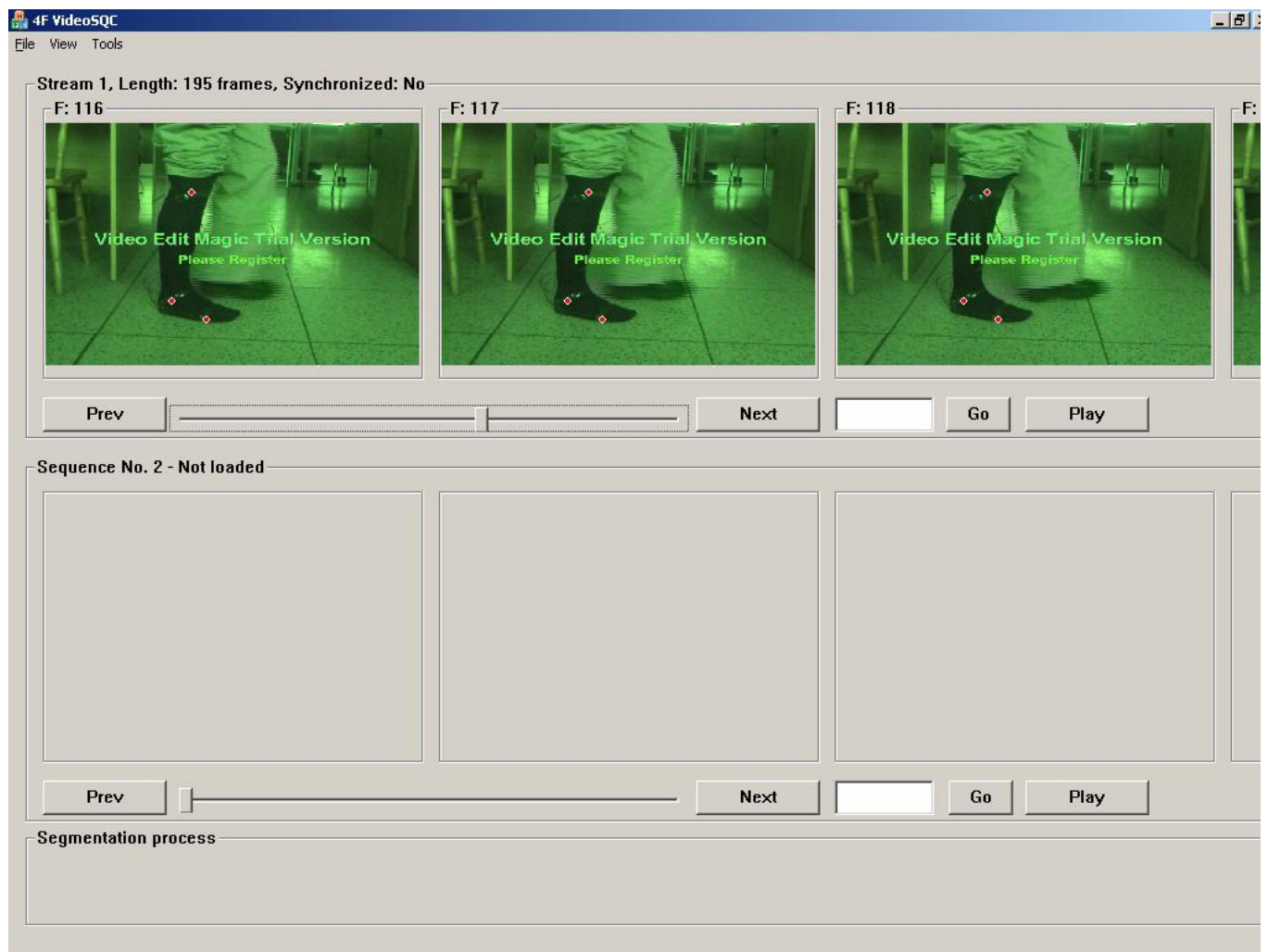
Predchádzajúce dva tímy vytvorili tri programy, ktoré v tejto kapitole zanalyzujeme.

#### 2.2.1.1 VideoSQC

Program slúži na segmentáciu videozáznamu, konkrétne na rozpoznanie značiek a zistenie ich súradníc z jednotlivých snímok video záznamu. Z jednotlivých snímok zisťuje len 2D súradnice jednotlivých značiek, čo je nedostatočné. Pre vytvorenie reálnej animácie pohybu ľudskej kostry(jej spodnej časti) v priestore, bude treba doplniť výpočet 3D súradníc zo snímok z viacerých kamier. Na samotnú segmentáciu je použitý veľmi jednoduchý algoritmus, ktorý nemá dostatočnú funkčnosť a presnosť.

Zdrojové kódy tohto programu sú pomerne čitateľné a dá sa v nich dobre orientovať. Predchádzajúci tím venoval najväčšie úsilie na synchronizáciu videozáznamov, ktorá bola rozpracovaná na dobrej úrovni, takže tejto časti nebude nutné venovať toľko pozornosti.

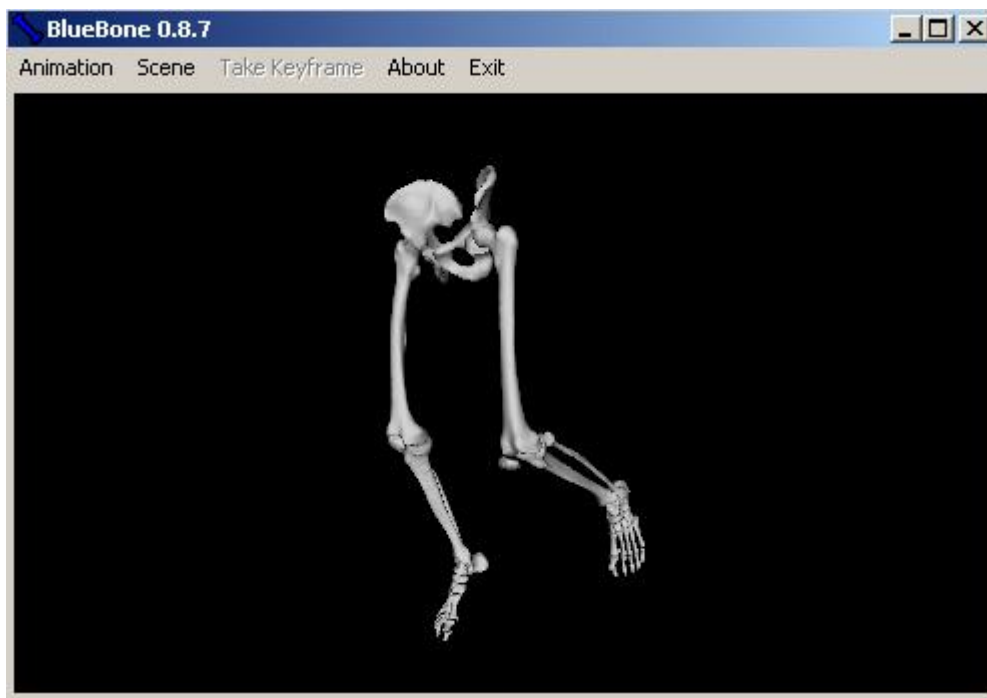
Napriek závažným nedostatkom, program necháme a upravíme ho od základov. Zdokonalíme algoritmus segmentácie, rozšírime jeho funkcie o predspracovanie obrazu a výpočet 3D súradníc. Z programu využijeme získavanie snímkov z video záznamu a synchronizáciu kamier. Tento program považujeme za kľúčový, preto mu budeme venovať najviac pozornosti. Výstupné dáta tohto programu budú slúžiť na animáciu kostry.



Obr. č. 6 Aplikácia VideoSQC

### 2.2.1.2 BlueBone2

Program zobrazuje zjednodušený model spodnej časti ľudskej kosti. Program umožňuje meniť polohu končatín, otáčať, rotovať, približovať a oddiaľovať pohľad na model. Umožňuje vytvoriť animáciu kostry priamo v programe, alebo načítať zo vstupného súboru. Program dokáže animovať kostru len raz, bude treba doprogramovať možnosť animovania kostry v opakujúcich sa cykloch. Program má drobné chyby, ktoré bude treba opraviť, ale inak je funkčný a vyhovuje potrebám nášho tímu.



Obr. č. 7: Aplikácia BlueBone

### 2.2.1.3 Analyser

Aplikácia analyser, ktorá bola vytvorená predchádzajúcimi tímami, umožňuje zobrazovať grafy pohybu ľudskej nohy. Aplikácia je prehľadne rozdelená na dve hlavné časti, a to oblasť grafov, ktorá sa nachádza na ľavej strane aplikácie, a oblasť ovládania na pravej strane.

Umožňuje zobrazenie nasledovných grafov zvlášť pre ľavú a pravú nohu:

- Bedrový kĺb
- Koleno
- Členok
- Päta
- Prsty
- Uhl'ová rýchlosť koleno-členok-prsty
- Uhl'ová rýchlosť koleno-členok-päta

Aplikácia zobrazuje dva typy grafov, a to zobrazenie y-ovej súradnice pohybu bodov na nohe v závislosti od času, a zobrazenie z-ovej osi. Aplikácia na hornom grafe v popise grafu v ľavo hore ukazuje, že zobrazované informácie sú z x-ovej osi, ale v dokumentácii k aplikácii je všade spomínaná y-ová os, čo je nepochopiteľný rozdiel, aplikácia asi v skutočnosti zobrazuje hodnoty z y-ovej osi.

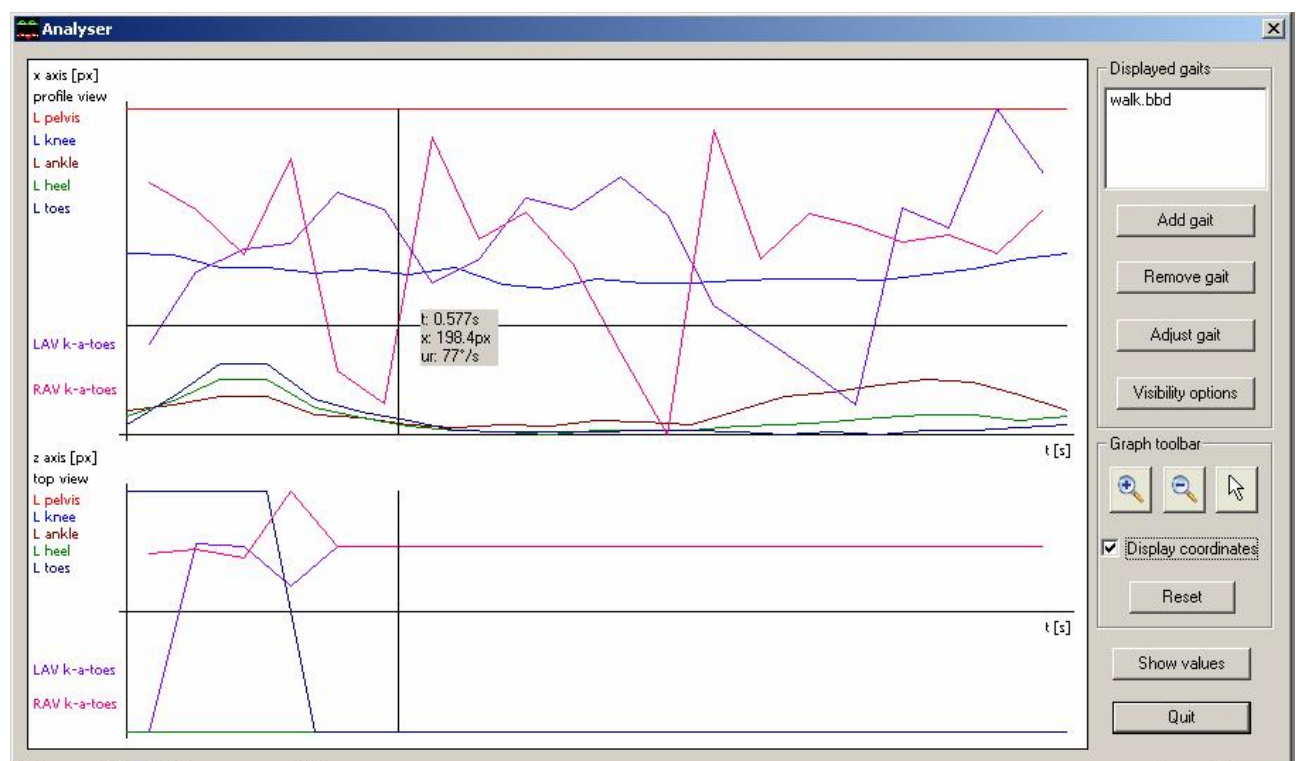
Veľmi vhodná a praktická je možnosť zobrazenia súradníc na aktuálnej polohe kurzora myši, keďže na osiach nie sú zobrazené hodnoty súradníc.

Aplikácia umožňuje zobraziť viacero analýz chôdzí v jednom grafe rozlíšením, pomocou typu čiary.

Grafy aplikácie sa dajú zväčšovať, znižovať a posúvať podľa potreby.

Jazyková verzia aplikácie je mätúca a nie veľmi dobre spracovaná, keďže základné zobrazenie aplikácie je celé v anglickom jazyku, ale nastavovacie modálne okná, ako aj okno tabuľky hodnôt, zobrazenie viditeľnosti grafov, a rôzne výstražné okná sú všetky v slovenskom jazyku, čo je trocha nekonzistentné. Aplikácia má nevhodné nastavenie kláves, lebo pri stlačení Esc alebo Enter sa automaticky zavrie, čo je trochu neštandardne správanie.

Ale celkovo je aplikácia dobre spracovaná a zobrazuje dobré a užitočné informácie pri analýze pohybu nohy.



Obr. č. 8 Aplikácia Analyser

## 2.2.2 Záver analýzy súčasného stavu projektu

Predchádzajúci tím realizoval zopár experimentov, z ktorých budeme vychádzať. Účelom je dosiahnuť animáciu pohybu oboch dolných končatín, preto dve kamery nebudú postačujúce. Pri bočnom pohľade by totiž nebolo možné vidieť značky na druhej nohe. Bude potrebné upraviť programy tak, aby dokázali spracovať vstupy z viacerých videokamier a dosiahnuť tak animáciu spodnej časti kostry.

## 2.3 Značková analýza (Marker Analysis)

### 2.3.1 Aktívne a pasívne značky

Z pohľadu videoanalýzy rozlišujeme dva základné typy značiek:

- aktívne značky
- pasívne značky

**Aktívne značky** sú spravidla zdrojom elektromagnetického žiarenia, ktoré je schopné rozoznávať záznamová videokamera. Najčastejšie sú používané tzv. vysokosvietiace LED diódy (v oblasti viditeľného svetla) alebo infračervené LED diódy.

K aktívnym značkám sa radia aj napr. ultrazvukové značky, avšak v ich prípade sa nepoužíva videoanalýza. K vyhodnocovaniu informácií získaných za pomoci ultrazvukových značiek je potrebné iné zariadenie ako videokamera.

**Pasívne značky** svojimi vlastnosťami umožňujú odrážanie svetla a tým zvýšenie intenzity osvetlenia v oblasti, kde je značka umiestnená (reflexné značky), prípadne zabezpečia ostrý farebný kontrast značky s jej okolím (kontrastné značky). V praxi sa môže jednať o útvary jasnejších farieb, napr. ploché telesá pokryté retroreflexnou páskou. Postprocesingom obrazu získaného z kamier (napr. prahovanie) sa značky zvýrazia a zamedzí sa zmäteniu segmentačného algoritmu.

Špeciálne značky sa používajú v oblasti infračerveného svetla. V tomto prípade sa obraz sníma infračervenými kamerami s prípadným použitím infračerveného filtra. Tento prístup

výrazne zjednodušuje algoritmus segmentácie obrazu. Pokým pri obyčajnom svetle vo viditeľnej oblasti vzniká v rámci nasnímanej videosekvencie množstvo farebných odtieňov rôznej svetelnej intenzity, čo zvyšuje obtiažnosť lokalizácie značky, pri infračervenom svetle rámec zachytáva v podstate len značky, od ktorých sa infračervené lúče odrazili vo výraznejšej miere v porovnaní s okolitým materiálom.

### **2.3.2 Umiestnenie značiek na povrchu tela**

Pri rozmiestnení značiek treba mať na zreteli, že z hľadiska kvality trojdimenzionálneho modelovania scény je potrebné, aby každá značka bola snímaná v každom okamihu aspoň dvoma kamerami. Táto požiadavka sa dá zabezpečiť zvýšením počtu kamier, ktoré snímajú sledovaný subjekt.

V prípade, že značky sú umiestnené priamo na povrchu tela subjektu, ich viditeľnosť v priestore je nižšia ako u značiek, ktoré sú umiestnené mimo povrchu tela (napr. sférické značky umiestnené na podporných stĺpkoch), a teda sú viditeľné pod väčším priestorovým uhlom. V druhom prípade sa zvýši pravdepodobnosť, že v danom okamihu je značka snímaná videokamerou. Tento postup je vhodný najmä v prípade, že laboratórium disponuje menším množstvom snímacích videokamier.

### **2.3.3 Aktívne značky s použitím LED**

Systémy so značkami LED zapínajú značky sekvenčne na relatívne krátku dobu, takže sú automaticky schopné identifikovať a rozpoznať konkrétnu značku na základe načasovania svetelného impulzu. Sledovanie značiek nie je v tomto prístupe žiadnym problémom, najmä v prípade dočasnej straty značky z dohľadu alebo vzájomného skríženia trajektórie dvoch značiek. Keďže splývanie dvoch značiek nie je v tomto prípade riskantné, značky je možné umiestniť v relatívne tesnej vzájomnej blízkosti. Tento fakt je nespornou výhodou predovšetkým v prípade snímania pohybu kostí chodidla nohy, a aj konkrétnych prstov, ktoré sú umiestnené v tesnej blízkosti jeden od druhého. Je celkom zrejmé, že použitie pasívnych značiek by bolo v tomto prípade veľkým problémom. Použitie sekvenčného systému LED diód ilustruje obr. č. 9.



Obr. č. 9 Použitie infračervených LED diód pulzujúcich sekvenčne v stanovenom poradí a časovaní

Okrem nespornej výhody v možnosti umiestnenia značiek v tesnej blízkosti nevýhodou tohto systému je nutnosť umiestnenia dodatočného príslušenstva na pacienta. V prípade dlhšie trvajúceho nepretržitého testovania by nevýhodou mohlo byť aj zahrievanie batérií a LED diód.

Pri použití infračervených LED diód sa pred konvenčnými videokamerami v profesionálnych laboratóriách uprednostňujú špeciálne kamery s poľami fotocitlivých diód umiestnenými za tieniacou maskou s pseudonáhodne rozloženým čiarovým kódom. Keď na subjekte blikne LED dióda, tieň masky sa premietne na pole senzorov špeciálnej kamery. Pozícia tieňa je v geometrickom vzťahu k pozícii značky. Priemerujúci efekt príspevku signálu všetkých fotocitlivých prvkov zlepšuje rozlišovaciu schopnosť systému a poskytuje dobrý pomer signál-šum.

### **2.3.4 Pasívne značky v oblasti infračerveného svetla**

Nespornou výhodou pasívnych značiek je ich nízka hmotnosť bez potreby upínania dodatočných batérií a káblov na telo pacienta. Po tele pacienta sú rozmiestnené reflexné značky, ktoré majú vyššiu odrazivosť infračerveného svetla ako ich okolie. Infračervené LED diódy rozmiestnené okolo šošovky kamery vysielaajú pulzy infračerveného žiarenia, ktoré sú značkami odrazené naspäť k šošovke kamery. Na šošovke je použitý jeden alebo viacero infračervených filtrov a prah systému je nastavený tak, aby zvýraznil jasnejšie značky a potlačil menej výrazné objekty v okolí.

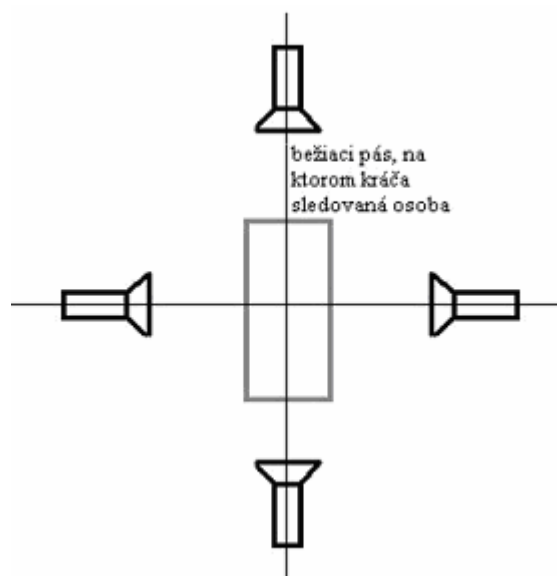
Pasívna povaha značiek vyžaduje, aby každá značka bola identifikovaná štítkom a stopovaná počas experimentu. Ak sa značka stratí z dohľadu kamery alebo dôjde k jej prekrytiu s inou

značkou, môže stratiť svoju správnu identifikáciu v systéme. Nebezpečenstvo prekrytia pasívnych značiek v tomto prípade určuje limity pre minimálnu vzdialenosť značiek.

## 2.4 Epipolárna geometria

Pri nahrávaní chôdze človeka sa použijú kamery, ktoré budú zaznamenávať pacientov pohyb pri pohľade spredu, zozadu a zboku. Zo záberov kamier budeme v neskorších krokoch rekonštruovať pozíciu jednotlivých značiek vzhľadom na nami zvolenú súradnicovú sústavu. V projektoch predchádzajúcich tímov sa uvažovalo s umiestnením kamier kolmo na seba (tzn. osi kamier zvierajú pravý uhol). To je však obmedzujúce, pretože vychýlenie osi niektorej z kamier vnesie do procesu určovania súradníc určitú chybu. Obmedzenie dané takýmto riešením je možné odstrániť práve použitím epipolárnej geometrie.[5][6][7] Tá nám umožní relatívne presne vypočítať požadované súradnice bez ohľadu na umiestnenie kamier v priestore, takže nie je nutné zaoberať sa presným nastavovaním pozícií kamier pred meraním.

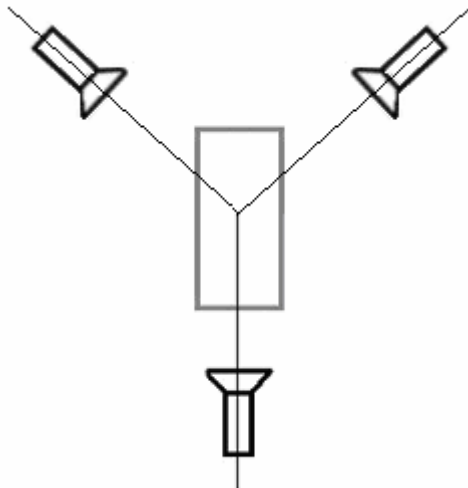
Ďalšou výhodou použitia epipolárnej geometrie je možnosť použitia menšieho počtu kamier pre dosiahnutie rovnakých výsledkov. Aby sme dokázali zaznamenať chôdzu obidvoch nôh, bolo by nutné použiť minimálne 4 kamery (znázornené na obr. č. 10), aby sa zachytili všetky značky rozmiestnené na končatinách.



Obr. č. 10 Snímanie chôdze 4 kamerami

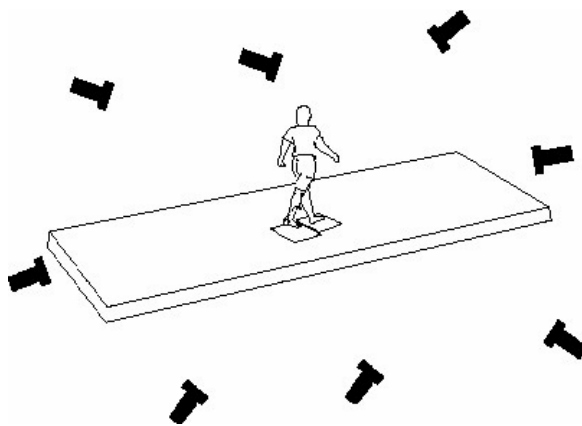


Pri efektívnom rozmiestnení kamier okolo pozorovaného objektu nám však na určenie 3D súradníc značiek postačia iba 3 kamery (obr. č. 11), pretože bočné kamery zachytia aj značky umiestnené na prednej strane nôh.



Obr. č. 11 Snímanie chôdze 3 kamerami

Epipolárna geometria predstavuje vo všeobecnosti nástroj, ktorý umožňuje narábať so scénou zachytenou ľubovoľným počtom kamier, pričom ich rozmiestnenie nie je nijako obmedzené (obr. č. 12).



Obr. č. 12 Scéna s 8 kamerami

Hlavným využitím epipolárnej geometrie je identifikácia korešpondujúcich si bodov zachytených na snímkach a rekonštrukcia ich 3D súradníc. Aby sme však vedeli určiť 3D súradnice zachytených bodov, je nutné vedieť správne nastaviť hodnoty interných a externých parametrov popisujúcich danú scénu.

Vnútorne parametre: ohnisková vzdialenosť kamier, pozícia riadiacich bodov

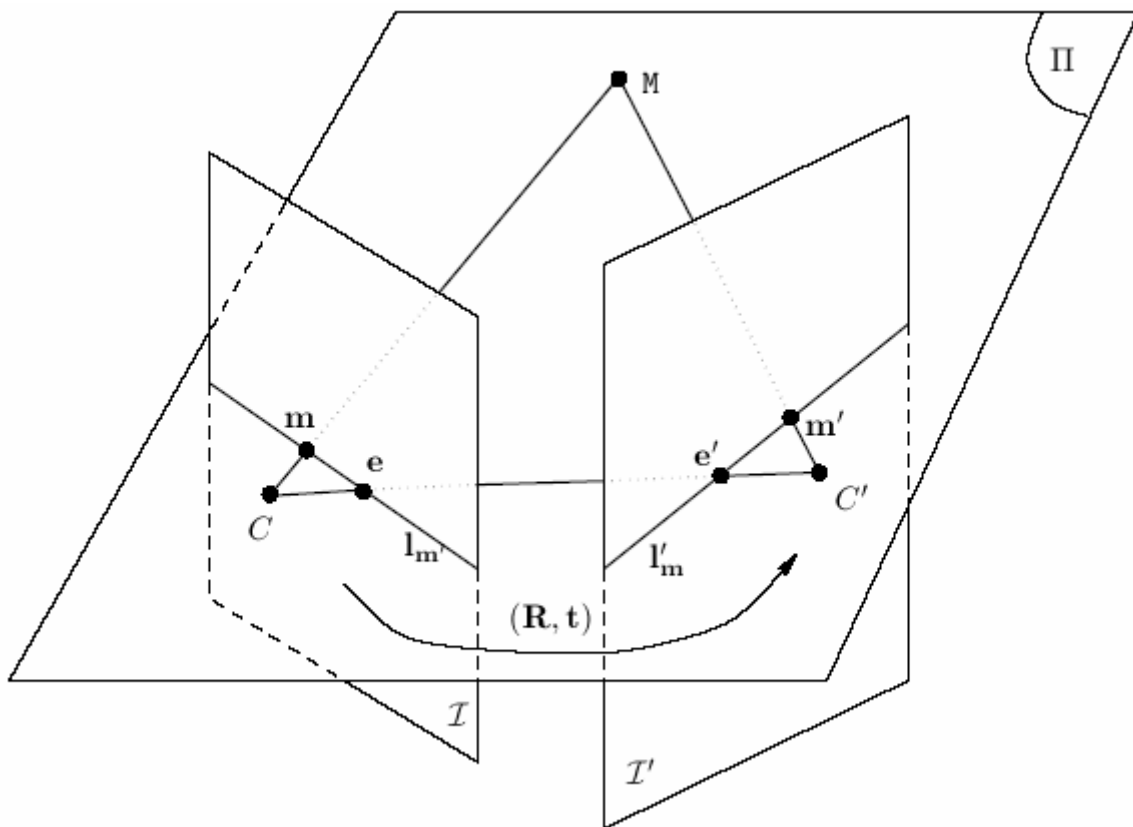
Vonkajšie parametre: posunutie a natočenie snímok voči sebe

Pokiaľ predpokladáme, že parametre sa počas nahrávania chôdze nemenia, nie je nutné použiť na ich určenie špeciálne kalibračné prístroje – dajú sa priamo vypočítať zo snímok scény (tzv. samokalibrácia).

## 2.4.1 Geometrický model

V tejto časti je uvedená jednoduchá schéma, pomocou ktorej sú vysvetlené základné pojmy z oblasti epipolárnej geometrie. Premenné vzťahujúce sa k druhej kamere sú označené apostrofom.

Na obrázku č. 13 je zobrazený geometrický model scény pozostávajúci z dvoch kamier. Bod  $M[x \ y \ z]^T$  predstavuje nejaký bod v priestore. Je zachytený pred obidvomi kamerami a zobrazený do bodov  $m[u \ v]^T$  a  $m'$  umiestnených v rovinách zobrazenia kamier. Rovina zobrazenia je vlastne obraz scény tak, ako je zachytený videokamerou.



Obr. č. 13 Scéna zložená z dvoch kamier

Body  $C$  a  $C'$  sú stredy premietania prvej a druhej kamery. Ich vzdialenosť od roviny zobrazenia sa potom nazýva ohnisková vzdialenosť  $f$ . Bod  $m$  na prvej rovine zobrazenia môže ležať kdekoľvek na priamke  $l'_m$  pri pohľade z druhej kamery a naopak. Tieto priamky určujú epipolárnu rovinu  $\Pi$ , ktorá je vlastne množinou všetkých potenciálnych pozícií bodu  $M$  v priestore. Prieniky spojnice ohnísk  $C$  a  $C'$  s rovinami zobrazenia sa nazývajú epipóly  $e$  a  $e'$ . Označujú miesta, kde na snímke vidíme druhú kameru.

## 2.4.2 Základné vzťahy v epipolárnej geometrii

Pre vzájomný vzťah medzi skutočným bodom  $M$  v priestore a jeho obrazom  $m$  na snímke platí vzťah:

$s \cdot m = P \cdot M$ , a po dosadení

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

kde  $s$  je ľubovoľná mierka a  $P$  je matica  $3 \times 4$ , nazývaná matica projekcie. V prípade, že súradnicová sústava má začiatok v  $C$  a jej osi sú rovnobežné s osami roviny zobrazenia, môže byť  $P$  rozložená do tvaru  $P = K \cdot [I, 0]$ , kde  $K$  je kalibračná matica  $3 \times 3$  mapuje súradnice prostredia do súradníc kamery,  $I$  je štvorcová identická matica  $3 \times 3$  je posunutie a  $0$  je nulový stĺpec.

$$K = \begin{bmatrix} a_x & c & t_x \\ 0 & a_y & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$a$  – škálovanie v smeroch osí  $x, y$ , súvisiace so zobrazovacím systémom

$t$  – súradnice optického centra – prienik zobrazovacej roviny s optickou osou

$c$  – parameter skreslenia (obvykle 0)

Matica projekcie  $K$  sa vo všeobecnosti líši od  $K \cdot [I, 0]$  orientáciou a posunutím voči začiatku súradnicovej sústavy. Pridáva sa preto matica transformácie súradnicovej sústavy kamery do sústavy prostredia:

$$P = K[I,0] * \begin{bmatrix} R & -RC' \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

kde  $R$  je matica 3 x 3 popisujúca rotáciu a  $C'$  je vektor posunutia vzhľadom na súradnicovú sústavu prostredia.

Aby sme dokázali popísať vzťah medzi dvoma obrazmi  $m$ ,  $m'$  toho bodu  $M$ , potrebujeme určiť maticu  $F$ , pre ktorú platí:

$$m'^T . F . m = 0$$

Matica  $F$  má rozmery 3 x 3 a nazýva sa fundamentálna matica. Je algebraickou reprezentáciou projektívnej geometrie medzi dvomi obrazmi – epipolárnej geometrie. Jej hodnoty závisia iba na vzájomnej pozícii kamier a ich kalibrácii (tieto hodnoty sú v maticiach  $P$ ,  $P'$ ).

## 2.4.3 Určovanie fundamentálnej matice

Problém hľadania matice projekcie je totožný s problémom hľadania fundamentálnej matice.

Na riešenie tohoto problému existuje niekoľko metód:

1. Lineárne algoritmy
2. Algoritmus algebraickej minimalizácie
3. Minimalizácia vzdialenosti

### 2.4.3.1 Základný lineárny osem-bodový algoritmus

Pre pár korešpondujúcich si bodov  $m[u \ v \ 1]^T$  a  $m'[u' \ v' \ 1]^T$  platí:

$$m'^T . F . m = 0$$

Teda po rozpísaní:

$$u'uf_{11} + u'vf_{12} + u'f_{13} + v'uf_{21} + v'vf_{22} + v'f_{23} + uf_{31} + vf_{32} + f_{33} = 0$$

Hodnoty fundamentálnej matice sa dajú usporiadať do vektora:

$$(u'u, u'v, u', v'u, v'v, v', u, v, 1).f = 0.$$

Pre viac korešpondujúcich si bodov sa vytvorí matica  $A$  pozostávajúca z takýchto vektorov. Riešenie je možné určiť presne, až na škálovanie. V prípade, že má matica  $A$  hodnotu väčšiu

ako 8, jej riešenie získame metódou najmenších štvorcov. V takom prípade je  $f$  singulárny vektor matice  $A$  združený s jej najmenším singulárnym číslom.

### 2.4.3.2 Algoritmus algebraickej minimalizácie

Dôležitou vlastnosťou fundamentálnych matíc ich singularita. Jednou z možností je konštruovať ju ako singulárnu, ako súčin

$$F = O[e]_x$$

Kde  $O$  je regulárna matica,  $[e]_x$  je nejaká koso-symetrická matica a  $e$  aproximuje epipól v prvom obraze. Aby sa splnili aj ďalšie podmienky fundamentálnej matice, potrebujeme aby sa minimalizovala hodnosť matice  $A$  pri podmienke, že hodnosť  $f = I$ .

### 2.4.3.3 Minimalizácia vzdialenosti

Táto metóda je založená na nelineárnej minimalizácii vzdialeností. Lineárnou metódou získame odhad matice  $F_L$ . Zvolíme vektor parametrov  $v$ , tak aby spĺňal požiadavky kladené na fundamentálnu maticu. Vypočítame parametre  $v$  tak, aby minimalizovali  $F_L - F(v)$ .

S využitím  $F(v)$  ako počiatočného kroku minimalizujeme chybovú funkciu vektora  $v$ :

$$\min \sum_{i=1}^n d^2(F(v), m_i, m'_i)$$

Kde  $d$  je vzdialenosť v metrickom priestore a  $m, m'$  je  $n$  korešpondujúcich bodov.

## 2.5 Úprava scény

Predchádzajúce dva tímy analyzovali možnosti úpravy scény pred jej samotným snímaním.

Táto problematika je z ich strany popísaná na dobrej úrovni. V analýze uviedli zásadné vlastnosti, ktoré treba zabezpečiť úpravou scény. Tieto vlastnosti môžeme zhrnúť nasledovne:

1. Dobré osvetlenie scény

2. Minimálny počet snímaných objektov
3. Jednoduché pozadie scény
4. Pozadie scény musí byť v kontraste so snímanými objektami.
5. Vhodné rozmiestnenie kamier

Podľa ich dosiahnutých výsledkov a priložených videozáznamov usudzujeme, že niektoré body neboli z ich strany vôbec splnené. Veľmi dôležité sú hlavne body 1 a 4. Niektoré existujúce systémy (napr. APAS/Gait), ktoré sme analyzovali v predchádzajúcich kapitolách, sa zamerali hlavne na tieto body a dosiahli tak vynikajúce výsledky. Použitím reflexných značiek a vhodným osvetlením scény zvýšili kontrast medzi značkami a okolím. Predchádzajúce tímy síce uviedli použitie reflexných značiek v analýze, avšak pri experimentovaní ich nepoužili.

V nasledujúcich podkapitolách uvedieme možnosti, ako dosiahnuť uvedené vlastnosti.

### **2.5.1 Rozmiestnenie kamier**

Bez použitia epipolárnej geometrie je najvhodnejšie rozmiestnenie kamier pod 90 stupňovým uhlom. Pri použití dvoch kamier na získavanie 3D súradníc je najvhodnejšie rozmiestniť ich tak, že jedna kamera bude snímať sledovaný objekt (človeka) zozadu a jedna kamera z boku (v skutočnosti sa nebude sledovať objekt, ale značky, ktoré sú na ňom umiestnené – viď nasledujúca podkapitola).

V prípade použitia ďalších kamier – jedna spredu a jedna z druhého boku. Použitie viac ako štyroch kamier však nepredpokladáme.

### **2.5.2 Kontrast medzi objektami a pozadím**

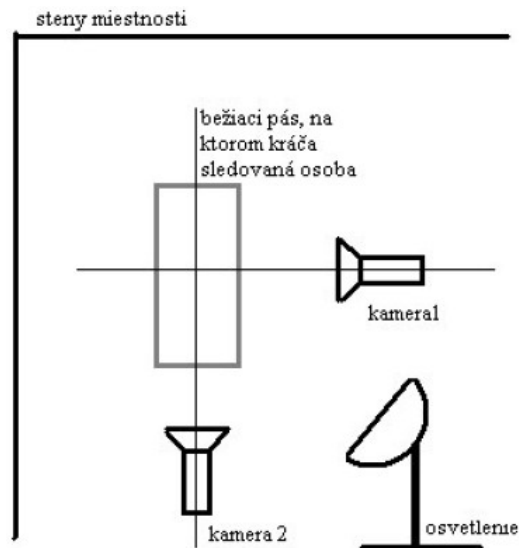
Pre zabezpečenie dostatočného kontrastu medzi sledovaným objektom a jeho okolím sa používajú rôzne kontrastné značky. Predchádzajúce tímy používali jednoduché značky malých rozmerov a pomerne nevýrazných farieb. Boli použité jednoduché značky z obyčajných farieb a LED diódy, ktoré svietili. Tiež používali zelený filter pred kamerou, aby tak zvýraznili len svietiace body (LED diódy). Filter však spôsobil, že nebol dosiahnutý dostatočný kontrast medzi značkami a okolím.

Výhodnejšie sa zdá byť použitie kontrastných značiek. Ich použitím dosiahli ľudia, ktorí pracovali na systéme APAS/Gait, vynikajúce výsledky v dosiahnutí takéhoto kontrastu. Pri použití reflexných značiek treba použiť aj vhodné osvetlenie scény. To je podrobne popísané v nasledujúcej podkapitole.

### 2.5.3 Osvetlenie scény

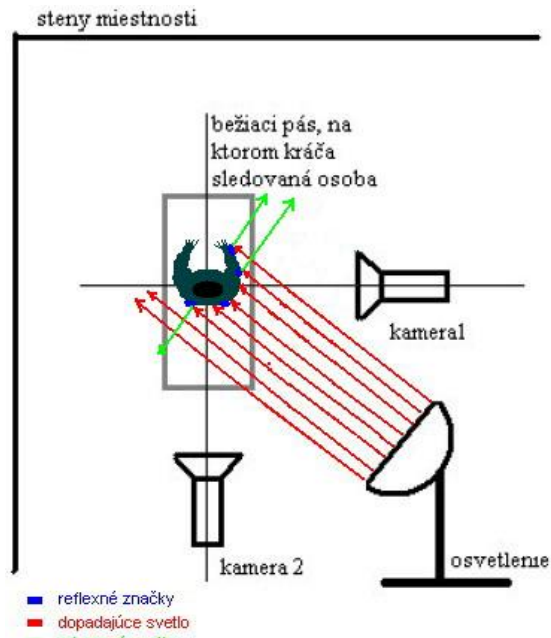
Existuje veľa možností, ako osvetliť scénu. Osvetlenie, ktoré sa bežne nachádza takmer v každej miestnosti nie je postačujúce pre účely tohto projektu. Najčastejšie sa nachádza na strope miestnosti a je všesmerové. Osvetlenie scény pre účely segmentácie je závislé aj na rozmiestnení kamier a na type použitých značiek.

Predchádzajúci tím chcel použiť pri experimentovaní dve kamery a zdroj svetla chceli umiestniť medzi tieto kamery. Jedna kamera snímala objekt zo zadu a jedna z boku. Zvierali teda 90 stupňový uhol a osvetlenie bolo umiestnené medzi týmito kamerami (s každou kamerou zvieralo 45 stupňový uhol). Toto rozmiestnenie je znázornené na nasledujúcom obrázku.



Obr. č. 14 Umiestnenie objektov

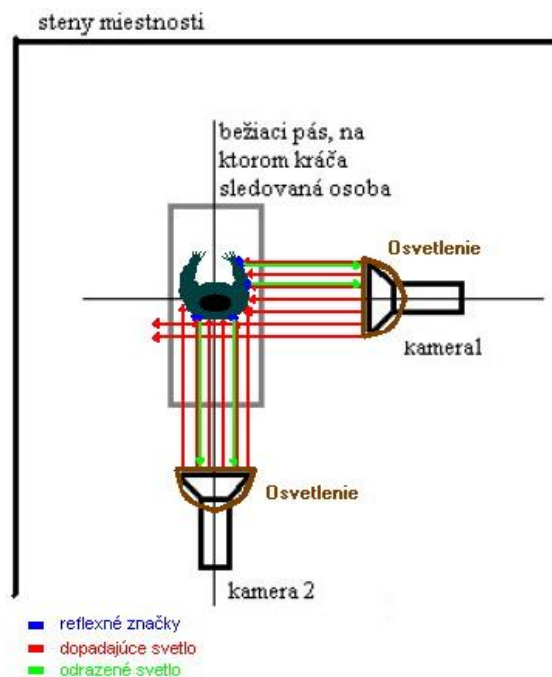
Ak predpokladáme použitie reflexných značiek pri použití takéhoto osvetlenia (umiestnené pod 45 stupňovým uhlom a s rovnomernými lúčmi), vyskytne sa nasledujúci problém, ktorý je znázornený na dolu uvedenom obrázku.



Obr. č. 15 Osvetlenie scény navrhované predchádzajúcimi tímami

Ako je vidno z obrázku, značky nebudú mať dostatočný kontrast s okolím, pretože odrazené svetlo z týchto značiek nesmeruje priamo do objektívu kamery.

Vhodnejšie je teda použiť nasledovné rozmiestnenie kamier, ktoré je znázornené na dolu uvedenom obrázku.



Obr. č. 16 Nami navrhované osvetlenie scény



Pri takomto rozmiestnení svetiel sa niektoré časti lúčov odrážajú zo značiek priamo do objektívu kamery. Tým sú reflexné značky jasnejšie oproti okoliu. Na zabezpečenie ešte väčšieho kontrastu medzi značkami a okolím je vhodné použiť tmavé oblečenie človeka a tmavú farbu stien. Tmavá farba pohlcuje svetlo a okolie značiek tak ostane tmavé.

## 2.6 Predspracovanie obrazu

Cieľom predspracovania obrazu je zvýrazniť určité črty obrazu, ktoré sú dôležité z hľadiska ďalšieho spracovania.[8] Predspracovanie obrazu tvorí často neoddeliteľnú súčasť spracovania obrazovej informácie. Zlepšuje kvalitu obrazu a tým prispieva k lepším výsledkom spracovania.

Metódy predspracovania obrazu sú založené na nadbytočnosti údajov v obraze. Typickým prípadom je skreslenie obrazovej informácie náhodným šumom. Tento sa dá odstrániť na základe priemeru hodnôt jasu v jeho blízkom okolí, pretože susedné body v obraze majú väčšinou rovnakú alebo podobnú hodnotu jasu.

### 2.6.1 Ekvalizácia (vyrovnanie) histogramu

Táto metóda slúži napríklad na hľadanie transformačného vzťahu pre modifikáciu jasovej stupnice. Príkladom takejto modifikácie je zvýšenie kontrastu pôvodne nekонтрастného obrazu.

Vo výslednom obraze po ekvalizácii histogramu sú jednotlivé jasové úrovne zastúpené približne v rovnakom množstve. Ekvalizácia zvýši kontrast pre úrovne jasu blízko maximálnemu histogramu a zníži kontrast blízko minimálnemu histogramu.

Vzťah pre ekvalizáciu je nasledovný:

$$q = T(p) = \frac{q_k - q_0}{N^2} \sum_{i=p_0}^p H(i) + q_0$$

pričom  $\langle p_0, p_k \rangle$  - interval jasov vo vstupnom obraze

$H(p)$  - histogram vstupného obrazu

$N$  - počet riadkov a stĺpcov  
 $\langle q_0, q_k \rangle$  - interval jasov vo výstupnom obraze  
 $q = T(p)$  - je výsledná jasová transformácia

## 2.6.2 Filtrácia šumu (lokálne predspracovanie)

Lokálne predspracovanie znamená výpočet jasov bodu vo výstupnom obraze na základe lokálneho okolia zodpovedajúceho bodu vo vstupnom obraze.

Rozdelenie lokálneho predspracovania:

- Vyhľadovanie obrazu – slúži na potlačenie vyšších frekvencií obrazovej funkcie. Tým sa chce dosiahnuť potlačenie náhodného šumu. Súčasne však dochádza k potlačeniu iných náhlych zmien jasov, napríklad ostrých hrán a čiar.
- Gradientové operácie – slúžia na zdôraznenie vyšších frekvencií – zvýraznenie hrán. Súčasne sú však zvýraznené aj šumové body.

Filtrácia šumu predstavuje potlačenie rozdielu jasov vo vnútri oblasti, ktorá je zašumená. V prípade, že veľkosť objektov je dostatočne veľká, šum je možné odstrániť spriemerovaním jasových hodnôt v istom okolí.

## 2.6.3 Obyčajné spriemerovanie

Obyčajné spriemerovanie filtruje obraz takým spôsobom, že ako nový jas bodu sa zvolí aritmetický priemer jasov bodov jeho okolia. Jeho nevýhodou je rozmazávanie hrán, ktoré sa eliminuje ďalšími filtračnými metódami. Filtrácia touto metódou je špeciálnym prípadom diskretnej konvolúcie. Pre okolie rozmeru 3x3 je konvolučná maska pre filtráciu obyčajným spriemerovaním:

$$h = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Často sa používa väčšia váha stredného bodu masky alebo jeho štyroch susedov:

$$h = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad h = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Tým sa lepšie aproximujú vlastnosti šumu s Gaussovským rozdelením.

## 2.6.4 Ďalšie metódy filtrácie

Často sa používajú aj iné metódy filtrácie, napríklad:

- Filtrácia metódou mediánu
- Metóda rotujúcej masky

Týmto sa podrobnejšie nebudeme venovať.

## 2.7 Segmentácia

Ako bolo uvedené vyššie, segmentácia slúži na rozdelenie obrazu na objekty, resp. na rozoznanie objektov v obrázku. Neexistuje žiadna univerzálna metóda segmentácie, ktorá by bola vhodná na ľubovoľné typy obrazov. Preto je dôležité vyskúšať širokú skupinu techník a postupov. Napodobniť rozpoznávanie, ktoré vykonáva ľudské oko a mozog, je veľmi zložitá úloha.[9]

Rozdelení metód segmentácie je pomerne veľa. Niektoré sú uvedené v literatúre.

Všeobecne môžeme metódy segmentácie rozdeliť na:

1. metódy založené na obrazových bodoch
2. metódy založené na oblastiach

Medzi metódy založené na obrazových bodoch patrí napríklad prahovanie alebo techniky založené na detekcii hrán.

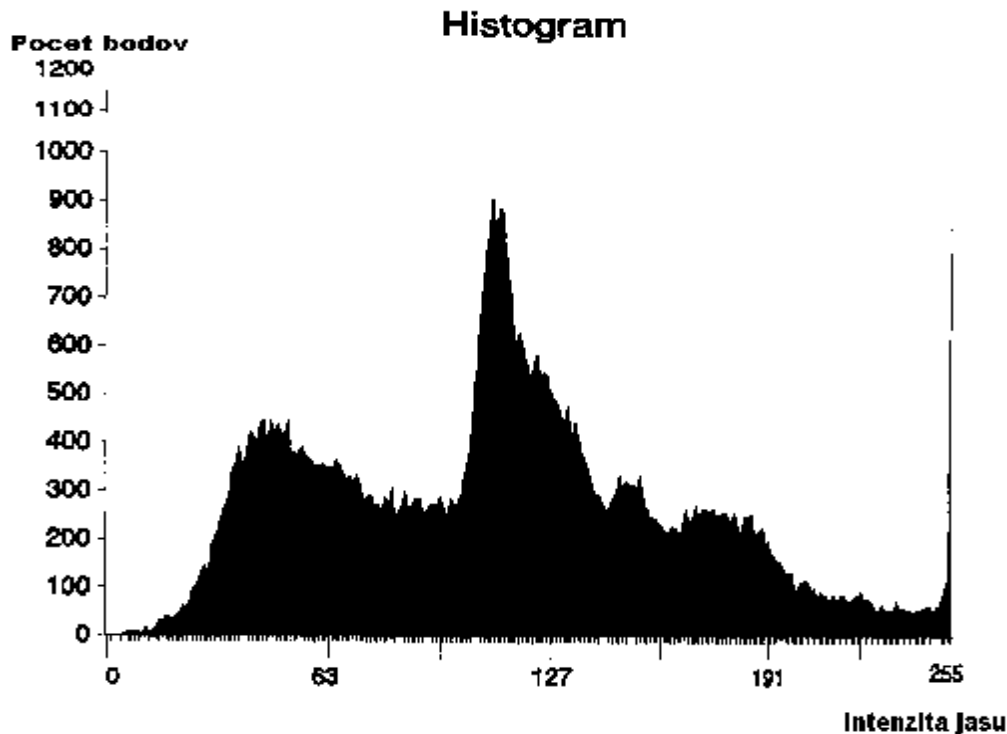
Základným princípom metód založených na oblastiach je hľadanie homogénnych oblastí v obraze.

## 2.7.1 Histogram

Histogram obrazu slúži na reprezentáciu zastúpenia jednotlivých jasových úrovní v digitálnom obraze. Je veľmi často používaný práve pri segmentácii obrazu (napríklad pre metódy prahovania – vid' nasledovná podkapitola). Histogram jasů je vektor  $H$  s počtom zložiek rovným počtu jasových úrovní. Hodnota každej zložky odpovedá početnosti bodov príslušného jasů v obraze.

Histogram digitalizovaného obrazu má niekoľko lokálnych miním a maxím. To môže spôsobiť komplikáciu pri jeho ďalšom spracovaní. Preto sa často histogram jasů vyhladzuje, aby sa potlačili jeho lokálne poruchy – vid' kapitola Predspracovanie obrazu.

Na nasledujúcom obrázku je znázornená ukážka takéhoto histogramu.



Obr. č. 17 Histogram

## 2.7.2 Prahovanie

Táto metóda používa na rozoznanie objektov v obraze jasovú hodnotu jednotlivých obrazových bodov. Vychádza z predpokladu, že objekty sú charakterizované konštantnou odrazivosťou, či pohltivosťou svetla na svojom povrchu. Ak obraz obsahuje dostatočne

kontrastné objekty vzhľadom na pozadie, dá sa použiť istá prahová hodnota k ich vzájomnému oddeleniu.

Prahovanie je najpoužívanejšou a najrýchlejšou segmentačnou metódou.

Metódy prahovania môžeme rozdeliť na:

- Jednoduché prahovanie
  - globálne prahovanie
  - poloprahovanie
  - spektrálne prahovanie
  - multispektrálne prahovanie
- Adaptívne prahovanie

### 2.7.3 Globálne prahovanie

Princíp tejto metódy spočíva v určení prahovej hodnoty. Na základe tejto hodnoty sa obrazové body rozdelia na body objektu a na body pozadia.

Výsledný obraz  $g(x, y)$  takto spracovaného pôvodného obrazu  $f(x, y)$  získame nasledovne:

$$\begin{aligned} g(x, y) &= 255 & \text{ak } f(x, y) > T \\ g(x, y) &= 0 & \text{ak } f(x, y) \leq T \end{aligned}$$

### 2.7.4 Poloprahovanie

Poloprahovanie je podobné globálnemu prahovaniu, avšak jasové hodnoty, ktoré presahujú prah  $T$  sa nemenia.

$$\begin{aligned} g(x, y) &= f(x, y) & \text{ak } f(x, y) > T \\ g(x, y) &= 0 & \text{ak } f(x, y) \leq T \end{aligned}$$

### 2.7.5 Spektrálne prahovanie

Pri spektrálnom prahovaní sa namiesto prahovej hodnoty používa interval hodnôt.

$$g(x, y) = f(x, y) \text{ ak } f(x, y) \in I$$

$$g(x, y) = 0 \quad \text{inak}$$

Kde I je interval jasových hodnôt.

## 2.7.6 Multispektrálne prahovanie

Len málokedy je možné úspešne prahovať s tým istým prahom na celej ploche obrazu. Je to spôsobené zmenami jasu objektu a pozadia zavinenými napr. nerovnomernosťou osvetlenia či nerovnakými vlastnosťami snímacieho zariadenia na ploche obrazu [1].

Používa sa v prípade, že na obrázku sa nachádza viac objektov s rôznymi jasovými hodnotami. V tom prípade môžeme použiť nasledovný vzorec:

$$g(x, y) = a_1 \quad \text{ak } f(x, y) \in I_1$$

$$g(x, y) = a_2 \quad \text{ak } f(x, y) \in I_2$$

...

$$g(x, y) = a_n \quad \text{ak } f(x, y) \in I_n$$

$$g(x, y) = 0 \quad \text{inak}$$

Kde  $I_1, I_2, \dots, I_n$  sú disjunktné intervaly jasových hodnôt

$a_1, a_2, \dots, a_n$  sú rôzne jasové úrovne.

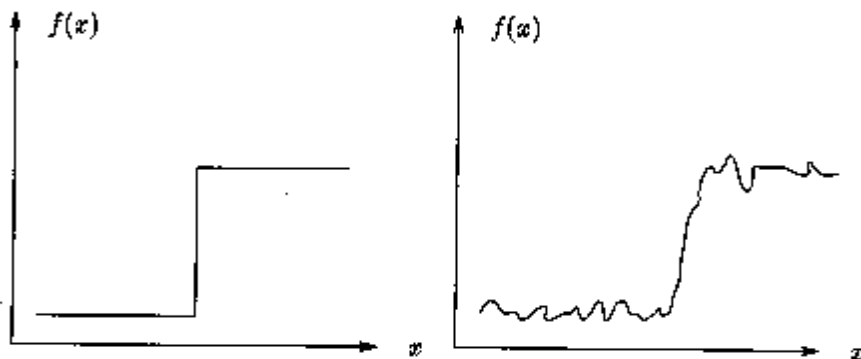
## 2.7.7 Určenie prahovej hodnoty T

Na vyjadrenie zastúpenia jednotlivých jasových úrovní v obraze sa často používa histogram. Pre každú jasovú úroveň zastúpenú v obraze udáva celkový počet bodov s týmto jasom [1].

V prípade, že predmety v obrázku majú výrazne odlišnú hodnotu jasu od pozadia (napríklad v prípade použitia reflexných značiek), ako prahovú hodnotu je vhodné použiť lokálne minimum medzi dvoma špičkami histogramu.

## 2.7.8 Metódy detekcie hrán

Mnoho segmentačných metód je založených na detekcii hrán. Tá je založená na myšlienke hľadania zmeny funkcie jasu  $f(x)$  v obraze (Pozri nasledujúci obrázok ).



Obr. č. 18 Ideálna hrana (a), reálna hrana (b)

Hrany sa hľadajú pomocou operátorov detekujúcich hrany (napr. prahovanie hodnôt jasu alebo gradientu jasu v obraze) [2]. Hľadajú sa teda hranice medzi oblasťami v obraze.

Problémom hranových segmentačných metód je výskyt hrán v miestach bez prítomnosti skutočnej hranice a súčasne absencia hrán tam, kde sa vyskytujú.

Detekcia hrán v zašumených obrazoch je veľmi problematická. Preto je vhodnejšie použiť iné techniky na segmentáciu – vid' metódy založené na oblastiach.

Obraz získaný hranovým operátorom sa nedá použiť ako segmentovaný obraz, v ktorom sú už rozlíšené jednotlivé objekty. Obraz je ešte nutné použiť ako vstup pre ďalšie spracovanie, ktoré pospája jednotlivé hrany do postupností, reťazcov – tie lepšie popisujú hranice objektov v obraze.

### 2.7.9 Metódy segmentácie založené na oblastiach

Tieto metódy na rozdiel od hranových operátorov priamo konštruujú oblasti v obraze [2].

Použitie týchto metód segmentácie je vhodné v prípade zašumených obrazov, kde dosahujú lepšie výsledky ako metódy založené na detekcii hrán. Podmienkou pre ich použitie v tomto prípade je homogenita oblastí v obraze.

Používajú sa nasledovné metódy :

- Delenie a spájanie oblastí
- Predelová segmentácia (Watershed segmentation)
- Zhodnosť, porovnávanie, podobnosť (Matching)

## **2.8 Záver analýzy**

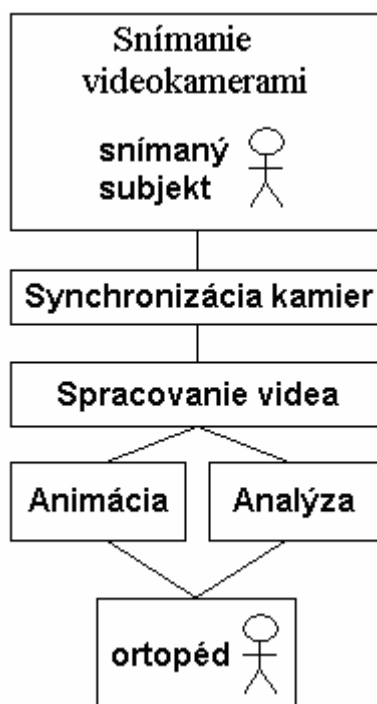
Problémová oblasť je pomerne rozsiahla a existuje viacero možných riešení. So súhlasom vedúceho projektu sme sa rozhodli vytvoriť portál, kde zdokumentujeme a zhrnieme rôzne prístupy a výsledky z tejto oblasti. Výrazne tak uľahčíme hľadanie informácií z tejto oblasti, poprípadе aj pre ďalší tím, ktorý sa bude venovať tejto problematike. Portál bude prístupný z web stránky tímu.



### 3 Hrubý návrh riešenia

Keďže tento projekt má výskumný/experimentálny charakter, nedá sa napísať presný návrh jednotlivých častí systému. Preto tu uvedieme len hrubý návrh systému. Algoritmy pre niektoré časti systému bude treba experimentovaním overiť tak, aby dosahovali čo najlepšiu úspešnosť. Predchádzajúce tímy vyriešili niektoré problémy, ktoré nebude treba znova riešiť, a môžeme sa venovať závažnejším problémom, ktoré vyriešené nie sú.

#### 3.1 Proces analýzy chôdze



Obr. č. 19 Proces analýzy chôdze

#### 3.2 Systém videokamier

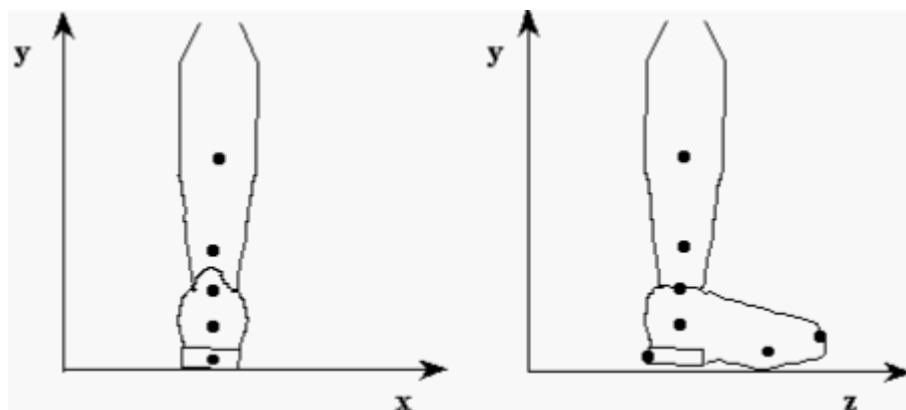
Na nasnímanie chôdze človeka bude potrebné použiť dve alebo viacej kamier. Keďže obraz má byť prezentovaný v 3D súradniciach, musia sa vypočítať zo všetkých kamier. Čím viac kamier sa použije, tým presnejšia bude výsledná animácia, pretože sa dosiahnu presnejšie výpočty. Na začiatku použijeme dve kamery na jednu nohu. Analýza bude prebiehať na oboch nohách, preto bude počet kamier dvojnásobný oproti jednej nohe, teda 4 kamery.

Jednou z požiadaviek je aj variabilný uhol medzi kamerami. V tomto prípade treba využiť epipolárnu geometriu. Uhol medzi kamerami ale určite nemôže byť ľubovoľný, aj vzhľadom na použité osvetlenie. Osvetlenie by nemalo svietiť priamo do kamery.

Chceme využiť reflexné značky, ktoré pri osvetlení sú výrazne viditeľné, a budú sa dať ľahko rozoznať. Preto v scéne musí byť umiestnené dostatočné svetlo, ktoré bude osvetľovať analyzovaný objekt.

Osvetlenie scény musí byť dostatočné, všetky značky musia byť osvetlené dostatočne silne, aby nevznikali chyby pri segmentácii obrazu. Nie je prípustné, aby niektoré značky boli v tieni a neboli osvetlené. Navrhujeme osvetľovať z dvoch zdrojov svetla umiestnených medzi bočnými a zadnými kamerami v strede, alebo budú mať mierne menší uhol k bočnej kamere. Presný vhodný uhol určíme pokusmi, uhol bude výrazne závisieť aj od samotného uhla medzi kamerami.

Umiestnenie značiek bolo riešené predchádzajúcimi tímami spolu s lekárom. Toto umiestnenie predbežne nebudeme meniť, keďže s lekárom sme sa ešte nestretli. Umiestnenie značiek je znázornené na obr. 19.



Obr. č. 20 Umiestnenie značiek

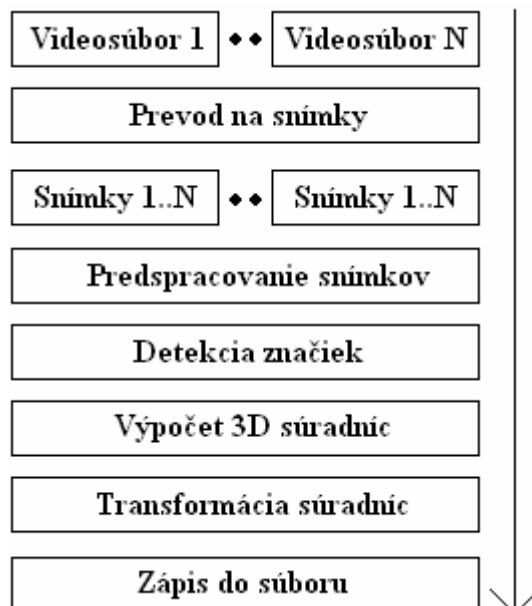
Keďže sa použijú reflexné značky, bude požiadavka na odstránenie všetkých rušivých vplyvov zo scény. Rušivé sú vplyvy iných reflexných predmetov, a predmetov, na ktorých sa odráža svetlo, ako napríklad zrkadlá. Pozadie scény by malo mať čo najmenej rôznych objektov a farieb, malo by byť jednoduché a jednofarebné.

### 3.3 Synchronizácia kamier

Synchronizáciu kamier riešili minulé tímy. Bolo prezentovaných niekoľko metód synchronizácie, z ktorých ako najvhodnejšie pre naše použitie je metóda blesku. Je veľmi jednoduchá a netreba pri nej špeciálne kamery. Túto metódu preferujeme aj my. Jednoducho sa po spustení všetkých kamier bleskne fotoaparátom, ktorý spôsobí na zázname výrazné zosvetlenie snímok, a programovo potom tieto snímky odstránime. Tiež sme ale rozmýšľali nad synchronizáciou pomocou LED diód alebo rôznych typov bodových svetiel. Tieto diódy alebo svetlá by boli umiestnené v istej časti snímaného poľa kamery a po spustení všetkých kamier sa tieto diódy, prípadne svetlá zapnú. Od tejto chvíle sú kamery synchronizované, a my nemusíme synchronizovať kamery externým bleskom, ktorý zvyšuje náklady na zariadenie. S LED diódami a svetlami budeme experimentovať a skúšať rôzne možnosti v procese implementácie, pretože vyžadujú zmenu kódu.

### 3.4 Spracovanie videa

Spracovanie videozáznamu je široký pojem, ktorý sa v našom prípade rozdeľuje na viacero podoblastí. Optimálne riešenie každej z nich si bude vyžadovať skúšanie rôznych algoritmov a experimentovanie. Celková schéma spracovania videozáznamu je na obr. XXX.



Obr. č. 21 Spracovanie videozáznamu

### 3.4.1 Prevod na snímky

Prevod na snímky bol riešený minulým tímom. Je zahrnutý v programe VideoSQC. Túto časť programu môžeme ponechať, je funkčná a nevyžaduje úpravy. Ak bude ale program pre dlhé videosúbory príliš pomalý, môžeme sa pokúsiť túto časť optimalizovať na rýchlosť.

#### 3.4.1.1 Predspracovanie snímkov a detekcia značiek

Minulý tím predspracovanie v programe VideoSQC nepoužil. Priamo detekoval značky pomocou segmentácie obrazu. Keďže ale nepoužívali reflexné značky, ich predspracovanie obsahovalo veľa chýb. Predpokladáme, že pri použití reflexných značiek predspracovanie nebude potrebné, keďže jas osvetlených reflexných značiek je dosť veľký a segmentácia bude bez chýb, resp. s nízkym počtom chýb. Ak by ale segmentácia nebola dostatočne kvalitná, z algoritmov predspracovania chceme použiť algoritmus ekvivalizácie (vyrovnania) histogramu. Tento algoritmus nám zabezpečí zvýšenie kontrastu pre body obrazu, ktoré sú na reflexných značkách. Pre tento algoritmus je potrebné vypracovať histogram každého snímku sekvencie. S použitými algoritmami pre predspracovanie obrazu budeme experimentovať, keďže nevieme, ktorý by sa najlepšie uplatnil v našom projekte.

Pri segmentácii obrazu využijeme algoritmus poloprahovania, ktorý všetky body, ktoré majú väčšiu intenzitu jasu ako prahovú intenzitu, nechá v pôvodnej hodnote intenzity jasu, a ostatným zníži jas na 0. Tiež rozmýšľame nad použitím globálnej segmentácie, ktorá intenzitu jasu bodov nad prahovou intenzitou jasu zväčší na maximálnu hodnotu 255.

Poloprahovanie chceme využiť, pretože dopredu nepoznáme intenzitu svetla v miestnosti, a svetlá z kamier budú v praxi rôznej intenzity. Po prahovaní musíme zistiť súradnice bodov algoritmom, kedy prechádzame prahovaný snímok a zisťujeme intenzitu bodov snímku. Takto dostaneme body, ktoré patria do značiek, z nich potom musíme určiť stredy značiek. Na určenie konkrétnej súradnice značky musíme určiť stred značky, aby bola detekcia čo najpresnejšia. Na výpočet stredu značky využijeme jednoduchý algoritmus, kedy si určíme pravú, ľavú, hornú a dolnú súradnicu značky a z nich vypočítame stred značky. Tiež môžeme experimentovať aj s týmto algoritmom a využiť pre nájdenie stredu aj viac bodov na značke.

### **3.4.1.2 Výpočet 3D súradníc**

Pokiaľ umožníme ľubovoľné rozmiestnenie kamier v priestore, je nutné do systému zakomponovať algoritmus, ktorý dokáže zo snímok vypočítať pozíciu kamier a určiť všetky potrebné parametre na rekonštrukciu súradníc. Na takýto proces samokalibrácie, t. j. keď budeme mať k dispozícii iba snímky kamier, použijeme základný osem-bodový algoritmus. Tento algoritmus bol spomedzi ostatných zvolený pre jeho rýchlosť a ľahkú implementáciu. Vo väčšine prípadov poskytuje aj pomerne presné výsledky. Ak však bude vyžadovaná väčšia presnosť, môže poslúžiť jeho výstup ako prvý krok v iteračných metódach ako je napr. metóda minimalizácie algebraickej chyby (obidve metódy sú uvedené v analýze).

Algoritmus potrebuje na vykonanie samokalibrácie minimálne 8 bodov viditeľných všetkými kamerami. Za takéto body môžeme považovať reflexné značky umiestnené na nohách. V prípade, že tieto budú na kalibráciu nevhodné, použijú sa vhodne rozmiestnené statické značky s potrebnými vlastnosťami. Snímky potrebné na kalibráciu je možné získať zo záberov, ktoré budú natočené pre účely analýzy a animácie pohybu.

Kalibráciu je nutné vykonať iba na začiatku. Keďže uvažujeme použitie statických kamier, vypočítané parametre sa nebudú v priebehu merania meniť. Vypočítané parametre sa potom môžu používať na transformáciu 2D súradníc značiek (získaných segmentáciou) do 3D súradníc sveta.

### **3.4.1.3 Transformácia súradníc a zápis do súboru**

Transformácia súradníc do formátu súboru analyzátoru BlueBone sa bude zabezpečovať v programe VideoSQC po výpočte 3D súradníc bodov animácie. Pri tejto transformácii bude treba korektne previesť 3D súradnice, a bude ich treba prispôbiť do už spraveného formátu súboru.

## **3.5 Animácia chôdze**

Animácia chôdze je riešená pomocou programu BlueBone. Tento program je spravený korektne a poskytuje dobrú funkčnosť. Model kostry bol spravený už prvým tímom, druhý

tím opravil v modeli niektoré chyby. Model je spravený dobre, zlepšiť by sa mohla funkcionálnosť systému a viac možností v menu systému.

### **3.6 Analýza chôdze**

Analýzu chôdze zabezpečuje program Analyser, ktorý zobrazuje 2D grafy. Tento program sme analyzovali a zistili sme niektoré nedostatky, ktoré sú popísané v časti analýzy existujúcich systémov, preto tento program bude treba mierne upraviť. Tiež možno upravíme množstvo a typy možných grafov.