

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Biomateriālu un biomehānikas institūts

Veronika FEDOTOVA

Doktora studiju programmas „Biomateriāli un biomehānika” doktorants

**SLĒGTĀS KINEMĀTISKĀS ĶĒDES
ANALĪZE SPORTISTU STARTAM
KAMANĪŅU-BOBSLEJA TRASE**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
I. KNĒTS

Konsultants
Dr. habil. paed., profesors
J. LANKA

Rīga 2012

PATEICĪBA

Šis darbs nevarētu tapt bez Oļega Kudrjašova[†] ieguldījuma kustību analīzes metodikas attīstīšanā Latvijā. *Requiescat in pace.*

Vēlos izteikt dziļu pateicību promocijas darba zinātniskam vadītājam Dr. habil. sc. ing., profesoram, LZA akadēmiķim Ivaram Knētam par atbalstu, sapratni un vienmēr labvēlīgu attieksmi visā darba izstrādes laikā. Pateicos darba zinātniskam konsultantam XIX Olimpiādes Mehiko dalībniekam desmitcīņā Dr. habil. paed., LSPA profesoram Jānim Lankam par izteiktiem uzmundrinājumiem un vērtīgiem padomiem.

Paldies RTU Biomedicīnas inženierijas un nanotehnoloģiju institūta vadītājam Dr. habil. phys., profesoram, LZA akadēmiķim Jurijam Dehtjaram, Dr. habil. sc. ing., profesoram Genādijam Sagalovičam, Dr. phys., profesoram Aleksejam Kataševam, Dr. sc. ing., profesoram Aldim Balodim un Dr. phys. Vinetai Zemītei par izcilu sagatavošanu studijām doktorantūrā.

Paldies Dr. Bill Sellers (The University of Manchester), M.Sc. Nick Flyger (Australian Institute of Sport) un Dr. habil. paed., profesoram Олег Немцев (Адыгейский Государственный Университет) par padomiem, izpalīdzību ar literatūru un izteikto kritiku darba izstrādes gaitā.

Dziļi pateicos Viktoram Piļipivam par nenovērtējamu palīdzību eksperimentālā materiāla vākšanā un nepieciešamās datorprogrammatūras apgūšanā.

ANOTĀCIJA

3D KUSTĪBU MODELĒŠANA, DATORA MODELĒŠANA, KAMANĪŅU SPORTS, KAMERU KALIBRĒŠANA, KUSTĪBU ANALĪZE, STARTA BIOMEHĀNIKA

Promocijas darbs ir veltīts kamaniņu starta datora modeļa izveidei un sportistu treniņu un sacensību vietām piemērotas kameru kalibrēšanas metodikas izstrādei. Darba struktūra ir sekojoša: ievadā ietverts tēmas pamatojums un aktualitāte, formulēts darba mērķis un uzdevumi, pierādīta darba zinātniskā novitāte un praktiskā vērtība.

Pirmajā nodaļā pēc pieejamiem literatūras avotiem sniegts bobsleja, skeletoņa un kamaniņu sporta vispārīgs raksturojums, atspoguļots tekošais pētniecības stāvoklis šajos sporta veidos, apkopoti publicēto pētījumu rezultāti laika periodā no 1978. līdz 2011. gadam. Detalizēti aprakstīta starta izpildes tehnika kamaniņu sportā, apskatīts kinemātisko ķēžu jēdziens un optoelektroniskās kustību analīzes pielietojums sporta biomehānikā, kā arī izskatīti datora modelēšanas jautājumi un ķermeņa masu ģeometrijas noteikšanas metodes sporta zinātnē.

Otrā nodaļā raksturotas darba izstrādē izmantotās iekārtas un metodes, aprakstīta eksperimentālo materiālu reģistrācijas gaita, pamatota jaunas videokameru kalibrēšanas metodikas izstrādes nepieciešamība un aprakstīta izstrādātās kalibrēšanas metodikas būtība.

Trešajā nodaļā ir analizēti iegūtie darba rezultāti, sniegts detalizēts izstrādāto datora modeļu apraksts un novērtēta modeļu pielietojamība.

Secinājumos ir formulēti sasniegtie darba rezultāti un atziņas.

Pielikumos ir ievietoti papildus skaidrojošie materiāli

Literatūras sarakstā ir uzskaitīti darbā izmantotie literatūras avoti (laika periods no 1978. līdz 2012. gadam).

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tā apjoms sastāda 124 lpp. Darbs satur 54 attēlus, 18 tabulas, 147 literatūras avotus un 9 pielikumus uz 42 lpp.

ANNOTATION

3D MOTION MODELLING, COMPUTER MODELLING, THE SPORT OF LUGE, CAMERA CALIBRATION, MOTION CAPTURE, BIOMECHANICS OF START

The Doctoral thesis concerns development of a computer model of start in the sport of luge and development of cameras' calibration procedure, which can be implemented at the athletes' competitive and training environment. The Thesis is organised as follows: justification of choice of the topic and its relevance is included in the Introduction together with objectives and rationale of the research. Validation of the scientific novelty and practical applicability of the research is also included in the Introduction.

In the **first chapter** a general description of bobsleigh, skeleton and the sport of luge (the sliding sports) is given on the basis of the available sources. Current research state and general conclusions from the studies conducted in the sliding sports during 1978 – 2011 are provided. The chapter also includes a detailed description of start performance in the sport of luge, the concept of kinematic chains in sports biomechanics, description of the motion capture method, computer modelling and computation of body inertia parameters in sports science.

The **second chapter** provides information on equipment and methods used in the study and the research material collection procedure. Also included is justification of the new calibration approach development and essence of camera calibration procedure.

In the **third chapter** the achieved research results are discussed and the developed models are described in detail together with their applicability analysis.

Conclusions include formulation of the results and general achievements of the research.

Appendices contain additional information and descriptive materials.

References present the list of sources used throughout the Thesis (including period from 1978 till 2012).

The doctoral Thesis is written in Latvian, includes 124 pages, and contains 54 figures, 18 tables, 147 references and 9 appendices on 42 pages.

SATURS

SATURS	5
IEVADS	7
1. LITERATŪRAS APSKATS	10
1.1. Kamaniņu-bobsleja trases sporta veidi	10
1.1.1. Sporta veidu vispārīgs raksturojums	10
1.1.2. Zinātniskie pētījumi „slīdēšanas” sporta veidos.....	13
1.1.3. Starta izpildes īpatnības kamaniņu sportā	16
1.2. Kinemātiskās ķēdes sporta kustībās.....	22
1.3. Kustību analīze mūsdienu sporta zinātnē.....	26
1.3.1. Telpisku koordinātu rekonstrukcija.....	30
1.3.2. Signāla filtrācija	31
1.4. Kustību modelēšana sporta biomehānikā.....	32
1.4.1. Ķermeņa masu ģeometrija.....	35
2. PĒTĪJUMA METODIKA	37
2.1. Datu reģistrācija.....	37
2.1.1. Pētījuma organizācija un pētījuma posmu raksturojums.....	37
2.1.2. Pētījuma dalībnieki.....	38
2.1.3. Izmantotā aparatūra	39
2.1.4. Aparatūras izvietošana	46
2.1.5. Datu reģistrācijas procedūra.....	48
2.2. Kameru kalibrēšana	50
2.2.1. 3D kameru kalibrēšana Simi Motion sistēmā	50
2.2.2. 3D kameru kalibrēšana ar datora modelēšanas palīdzību	52
2.3. Datu apstrāde	55
2.3.1. Datu ievadīšana un sākotnējā apstrāde.....	55
2.3.2. Sportistu ķermeņa segmentu koordinātu noteikšana	57
2.3.3. Datora modelēšana	60
3. DARBA REZULTĀTI UN TO APSPRIEDE.....	61
3.1. Telpisku koordinātu rekonstrukcijas metodiku salīdzināšana	61
3.2. Starta izpildes laika analīze.....	65
3.2.1. Starta un finiša laika korelācija Siguldas kamaniņu trasē	65
3.2.2. Laika mērījumi Siguldas starta estakādē.....	66
3.2.3. Starta fāžu izpildes laiks.....	68
3.2.4. Starta izpildes uzlabošanas novērtējums estakādē	69

3.3. Kamanīņu starta datora modelis	71
3.3.1. Estakādes datora modelis	71
3.3.2. Sākotnējie pieņēmumi un to pārbaude	72
3.3.3. Plakanisks modelis	79
3.3.4. Telpisks rokas modelis	86
3.3.5. Ķermeņa modelis.....	94
3.3.6. Dināmisko parametru novērtēšana	102
3.4. Starta tehnikas vizualizēšanas modelis	104
SECINĀJUMI.....	107
CONCLUSIONS.....	108
DARBA APROBĀCIJA.....	109
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	113
PIELIKUMI.....	125

IEVADS

Mūsdienu sabiedrībā sportam ir daudzveidīga loma gan individuālajā un valsts, gan globālajā līmenī. Kā galvenās sporta funkcijas, nerunājot par tā rekreatīvo funkciju, jāmin fiziski un garīgi veselīgas nācības veidošana, dažādu iedzīvotāju grupu sociālā integrācija un kultūras barjeru pārvarēšana. Augstāko sasniegumu sports ne tikai kalpo par stimulu dažāda vecuma grupu pārstāvju iesaistei sporta nodarbībās un veselīga dzīvesveida uzturēšanai, bet arī popularizē valsts tēlu pasaulē un novirza starpvalstu konkurenci neagresīvajā sfērā. Vēlme uzturēt valsts prestižu mudina straujiem tempiem attīstīt pētniecību dažādās zinātnes nozarēs, lai izmantotu jaunākos zinātnes sasniegumus sportisko rezultātu uzlabošanai starptautiskajā arēnā. Sporta pētniecība nav vērsta vienīgi uz rezultātu uzlabošanu – mazākā mērogā pētījumu mērķis ir arī sportistu traumatisma mazināšana un rehabilitācijas procesu efektivitātes paaugstināšana. Galvenās sporta pētījumu atziņas pielietojamas ne tikai augstāko sasniegumu sportistu līmenī, bet nonākot plašākā sabiedrībā palīdz celt arī cilvēku vispārējo dzīves kvalitāti. [144]

Latvijas izlases pārstāvji guvuši ievērojamus panākumus dažādos sporta veidos, nodrošinot sportistu iekļūšanu Olimpiskajā elitē: pēdējos 20 gados medaļas tika izcīnītas katrā Vasaras Olimpiādē, bet pēdējo divu Ziemas Olimpisko spēļu laikā iegūtas medaļas arī ziemas sporta veidos. Mūsdienu augstāko sasniegumu sports nav iedomājams bez zinātniski pamatota treniņu procesa, kas balstās uz ilggadēju novērojumu un pētījumu rezultātu apkopojumu. Zināšanu bāzes paplašināšana stimulē sporta veidu attīstību un palīdz veidot priekšnosacījumus sportistu paaudžu maiņai un izcilu sportisko rezultātu sasniegšanai.

Problēmas būtība un aktualitāte

Sporta veidi, ar kuriem nodarbojas salīdzinoši neliels sportistu skaits, parasti raksturojas arī ar mazāku pētījumu daudzumu un līdz ar to vājāku regulējošu pamatprincipu izpratni. Pie šādiem sporta veidiem var pieskaitīt arī kamaniņu-bobsleja trases sporta veidus – skeletonu, bobsleju un kamaniņu sportu, kuros visā pasaulē ir iesaistīti tikai daži simti sportistu. Neliels sportistu skaits nav vienīgais publicēto pētījumu trūkuma iemesls. Pastāvot asai sporta lielvalstu konkurencei un novērojot ikgadējo sportisko rezultātu kāpumu, ir pamats domāt, ka pētnieciskais darbs šajos sporta veidos attīstās, bet rezultāti netiek plaši publicēti. [80]

Tehniskos sporta veidos, pie kuriem pieder kamaniņu-bobsleja trases sporta veidi, rezultāts ir atkarīgs gan no sportista iemaņām un fiziskās sagatavotības, gan no ekipējuma piemērotības konkrētiem apstākļiem. Galvenie virzieni, kuros strādā kamanu konstruktori, ir aerodinamisko

īpašību uzlabošana un slīdes berzes samazināšana starp sliecēm un ledu. Šo darbu iznākums dažreiz balansē uz noteikumu pārkāpuma robežas un pārsvarā paliek nacionālo komandu ziņā kā komercnoslēpums. Otrs rezultātu paaugstināšanas ceļš ir sportistu iemaņu un fiziskās sagatavotības uzlabošana treniņu gaitā. Treniņu programmas pilnveide augstākajā sportiskajā līmenī nav iespējama bez sportistu individuālo īpatnību novērtēšanas un izprašanas, kas, savukārt, pieprasa notiekošo biomehānisko un fizioloģisko procesu analīzi.

Visi kamaniņu-bobsleja trases sporta veidi Latvijā attīstās ļoti veiksmīgi un šobrīd ir perspektīvākie ziemas sporta veidi. Ar tiem saistās Latvijas izlases lielākās cerības galvenajā sporta notikumā – Olimpiskajās spēlēs. Jau ir sasniegti teicami rezultāti – trīs Olimpiskās medaļas pēdējās divās Ziemas Olimpiādēs, daudzkārt ieņemtās godalgotās vietas Pasaules čempionātā un Pasaules Kausa izcīņā. Augsta sportiskā rezultāta saglabāšanai izlases dalībniekiem jāiztur konkurence ar citu valstu pārstāvjiem, kas mudina meklēt iespējas savas treniņu un sacensību darbības efektivitātes celšanai. Kinemātisko un dināmisko rādītāju analīze ir solis uz priekšu svarīgāko sporta kustību aspektu izprašanā, kas ir aktuāli gan esošo izlases dalībnieku treniņu kvalitātes paaugstināšanai, gan jauno sportistu izaugsmei.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba **mērķis** ir sportista ķermeņa un kamanu veidotās slēgtās kinemātiskās ķēdes darbības analīzes metodikas pilnveide un pielāgošana augstāko sasniegumu sportistu treniņa procesa atgriezeniskajā saitē sniegtās informācijas kvalitātes uzlabošanai.

Atbilstoši darba mērķim izvirzīti sekojoši darba uzdevumi:

- izstrādāt sportista ķermeņa un kamanu veidotās kinemātiskās ķēdes datormodeli sportistu starta kustību individuālo kinemātisko un dināmisko rādītāju novērtēšanai;
- izstrādāt kamaniņu starta kustības vizualizēšanas datormodeli reāli izpildīto, kā arī teorētiski optimizēto starta kustību datora imitēšanai;
- izstrādāt un verificēt kalibrēšanas metodiku, kas piemērota sportistu treniņu un sacensību apstākļiem un vienkāršo optoelektroniskās kustību analīzes realizāciju, vienlaikus nodrošinot punktu koordinātu noteikšanas precizitāti;
- novērtēt kamaniņu starta izpildes laika parametrus Siguldas trasē un starta estakādē.

Zinātniskā novitāte

Pirmo reizi tika izstrādāts datora modelis kamaniņu sporta starta kustības datora imitēšanai. Teorētiski noteikts precīza modeļa izveidei nepieciešamo segmentu un atļauto brīvības pakāpju skaits. Novērtēta starta un finiša laika savstarpējā sakarība Siguldas trasē, kā arī sākotnējo starta fāžu ietekme uz kopējo starta laiku kamaniņu sportā. Pierādīts, ka sportista un kamanu masu centru horizontālie ātrumi sākotnējo kamaniņu starta fāžu izpildē ir atšķirīgi.

Darba praktiskā nozīme

Darbā izveidotais kamaniņu starta datormodelis ļauj iegūt sportistu izpildīto kustību kinemātiskos un dināmiskos rādītājus, kā arī prognozēt šos parametrus teorētiski modificētām kustībām. Izstrādātā kalibrēšanas metodika kopā ar vizualizēšanas modeli būtiski uzlabo kustību analīzes praktisko realizāciju sportistu treniņu un sacensību apstākļos. Pateicoties izveidotam estakādes datormodelim, kalibrēšanas metodika ir viegli adaptējama skeletoņa un bobsleja starta analīzei.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Kamaniņu-bobsleja trases sporta veidi

1.1.1. Sporta veidu vispārīgs raksturojums

Kamaniņu sports un vēl divi ziemas sporta veidi – bobslejs un skeletons – ir tie sporta veidi, kurus dažreiz dēvē par „slīdēšanas” sporta veidiem („sliding sports” angļu valodas literatūrā). Visi trīs sporta veidi uz 2012. gadu ir iekļauti Ziemas Olimpisko spēļu programmā: skeletons divās disciplīnās, kamaniņu sports un bobslejs trīs disciplīnās (ar 2014. gada Soči Olimpiskajām spēlēm kamaniņu sports tiks pārstāvēts četrās disciplīnās – divās individuālajās, divnieku ekipāžu sacensībās un stafetē). Sporta veidus vieno izmantojamās trases un zināmā mērā arī sacensību noteikumi – ar vadāmām kamanām sportisti lielā ātrumā brauc pa speciāli izbūvētām līkumotām dzelzsbetona trasēm ar ledus pārklājumu; uzvarētājus nosaka pēc īsākā brauciena laika saskaitot kopā laiku visos braucienos vienās sacensībās. Šobrīd lielākajā daļā no pasaules mākslīgajām trasēm var rīkot sacensības gan bobslejā un skeletonā, gan kamaniņu sporta Olimpiskajā paveidā. Sportistiem jāvada kamanas caur asiem pagriezieniem lielā ātrumā, tādēļ tehniskais aprīkojums un sportistu iemaņas šajos sporta veidos spēlē svarīgu lomu. Izcilāko sportistu prasmes kamanu vadīšanā ir atstrādātas tik labi, ka atšķirības starp pirmās un ceturtās vietas ieguvējiem Pasaules klases sacensībās bieži sastāda tikai sekundes tūkstošdaļas. Šāda homogenitāte sportistu rezultātos ir viens no iemesliem, kādēļ liela uzmanība „slīdošos” sporta veidos ir veltīta startam, kurā priekšrocība ir ne tikai prasmīgākajiem, bet arī fiziski labāk sagatavotajiem sportistiem. [15]

Visu trīs „slīdēšanas” sporta veidu vēsture aizsākās XIX gadsimta beigās Alpu ziemas kūrortos; Šveices kūrorta pilsētiņā Sanktmoricā 1903. gadā uzbūvēja pirmo ledus trasi. Olimpisko sporta veidu saimei pirmais pievienojās bobslejs – 1924. gadā I Ziemas Olimpiskajās spēlēs bobslejā startēja vienā disciplīnā, proti, četrinieku sacensībās; vīriešu divnieki tika iekļauti programmā 1932. gadā, bet sieviešu bobsleja komanda debitēja Olimpiskajās spēlēs 2002. gadā Soltleiksitijā. Skeletons Olimpiskajās spēlēs parādījās pirmo reizi 1928. gadā, nākošreiz tas bija iekļauts programmā 1948. gadā, un pēc tam atgriezās Olimpisko spēļu programmā tikai 2002. gadā, bet jau divās disciplīnās – sieviešu un vīriešu individuālajos braucienos. Trīs kamaniņu sporta disciplīnas – sieviešu, vīriešu un divnieku ekipāžas – tika iekļautas Ziemas Olimpisko spēļu programmā ar 1964. gada spēlēm Insbrukā.

Kopš 2004./2005. gada sezonas kamaniņu sports papildinājās ar ceturto disciplīnu – komandu stafeti. 2011. gadā SOK Izpildkomitejas sēdē paziņots, ka ar 2014. gadu šī disciplīna tiks iekļauta Olimpisko spēļu programmā. [47, 50, 139, 140]

Neskatoties uz kopīgām iezīmēm, atšķirības starp bobsleju, skeletonu un kamaniņu sportu ir būtiskas. Bobslejs ir pārstāvēts tikai ar komandu disciplīnām, mūsdienu bobsleja kamanas ir daļēji slēgtas (visos „slīdošos” sporta veidos kamanu konstrukcija ir ievērojami mainījusies salīdzinot ar XX gadsimta sākumu), un sportisti tajās atrodas sēdus pozīcijā. Startā komanda iestumj kamanas skrienot tām blakus, un tad viens aiz otra sportisti ielec kamanās un ieņem braukšanas pozīciju (1.1. attēls (a)). Lai veiktu starta ieskrējieni, trasēs ir paredzēts taisns posms ar nelielu horizontālu kritumu (2% pirmajos 15 metros saskaņā ar Starptautiskās bobsleja un skeletoņa federācijas FIBT noteikumiem).

Skeletonā ir tikai individuālie braucieni vīriešiem un sievietēm, kamanas ir vaļējas un sportisti atrodas uz tām guļus uz vēdera, ar galvu braukšanas virzienā; starta vieta trasēs sakrīt ar bobsleja startu. Lai iestumtu kamanas, sportistiem skrienot ir jānoliecas ļoti zemu ar vienu roku noturot kamanas vajadzīgā virzienā, kā parādīts 1.1. attēlā (b). [48, 49, 139, 140]



(a)



(b)



(c)

1.1. att. Startu izpilde kamaniņu-bobsleja trasē [139, 142]

(a) bobslejs, četrinieku ekipāža; (b) skeletons; (c) kamaniņu sports.

Kamaniņu sportā ir pārstāvētas gan individuālās, gan komandu disciplīnas. Starptautiskās kamaniņu sporta federācijas FIL noteikumi neaizliedz veidot kombinētās (vīriešu un sieviešu) divnieku ekipāžas, bet visbiežāk divniekā brauc divi vīrieši. Kamanas šajā sporta veidā ir vaļējas, lielākas un vieglākas, nekā skeletonā (23 kg, skeletonā – līdz 43 kg); liela uzmanība tiek pievērsta kamanu sliecēm, it īpaši to slīdes īpašībām. Kamanu uzbūvi regulējošie noteikumi pievienoti šim darbam 1. pielikumā. Sportisti brauc guļus uz muguras ar kājām braukšanas virzienā. Starta tehnika principiāli atšķiras no bobsleja un skeletona, un trasēs kamaniņu sportam ir paredzētas atsevišķas starta vietas ar ļoti īsu horizontālo posmu (skat. 1.1.3. apakšnodaļu). Vīriešiem starta vietu izvieto augstāk, bet sievietēm un divnieku ekipāžām pēc aptuveni 100 metriem, tuvāk finiša vietai. Sportisti startē atrodoties kamanās sēdus pozīcijā un ar rokām veicot starta rāvienu, bet pēc tā cenšas paātrināt kamanas ar rokām atgrūžoties no ledus virsmas (1.1. attēls (c)). Brauciena laiku kamaniņu sportā nosaka ar precizitāti līdz sekundes 1/1000 daļai (skeletonā un bobslejā – līdz sekundes 1/100 daļai). Laiku trasē reģistrē izmantojot fotoelementus, kurus pēc FIL noteikumiem jāuzstāda 30 mm augstumā no trases betona virsmas. Pirmais pāris tiek uzstādīts 5 līdz 10 m attālumā no starta rokturiem – pēc šīs gaismas barjeras šķērsošanas uzsākas brauciena laika reģistrēšana. Otro pāri ir jāuzstāda tā, lai laiks, kas pāriet līdz tā šķērsošanai, ir lielāks par 3 sekundēm, bet ja tas nav iespējams, tad pēc pirmās virāžas. Laiks starp pirmajiem diviem fotoelementu pāriem tiek reģistrēts protokolā kā starta laiks, taču reālais starta laiks skaitot no starta rāviena ir ilgāks (skat. 1.1.3. apakšnodaļu). Bez starta un finiša laika sacensību protokolā reģistrē vēl vismaz 3 starplaikus, visus ar precizitāti līdz sekundes 1/1000 daļai.

Atšķirībā no tādiem izplatītiem sporta veidiem kā, piemēram, vieglatlētikas disciplīnas, kamaniņu sportā, bobslejā un skeletonā rezultātu stipri ietekmē trases uzbūve un ārējie apstākļi: katrā trasē brauciena laiki ir atšķirīgi, arī vienā un tajā pašā trasē laiki var ievērojami variēt starp sporta sezonām celtnes pārbūves rezultātā (piemēram, Sanktmoricas trase tiek uzcelta no jauna katru sezonu). Tas apgrūtina trases pārvarēšanas laika izmantošanu kā primāro sportista vērtēšanas kritēriju, jo savā starpā var būt salīdzināti tikai vienā un tajā pašā trasē uzrādītie rezultāti, dažos gadījumos nevar salīdzināt rezultātus, kas uzrādīti vienā trasē dažādās sacensībās. Tas pats attiecas arī uz ātrumu, kuru sportisti attīsta trasē – konstruktīvo atšķirību dēļ dažas trases ļauj sasniegt ātrumus augstākus par 150 km/h, citās trasēs maksimālais ātrums ir zem 100 km/h. Kā kritēriju sportistu veikuma salīdzināšanai dažādās trasēs var izmantot sacensībās iegūto vietu, bet tas nesniedz pietiekoši daudz informācijas par konkrētā sportista sagatavotības līmeni.

1.1.2. Zinātniskie pētījumi „slīdēšanas” sporta veidos

Skeletons, bobslejs un kamaniņas kā sports attīstās jau vairāk nekā gadsimtu un ir populāri tādās lielvalstīs kā ASV, Kanāda, Vācija, Lielbritānija, kuras iegulda resursus dažādās zinātnes jomās, lai nodrošinātu savu komandu panākumus augstu sasniegumu sportā un uzturētu valsts prestižu. Bet neskatoties uz to „slīdēšanas” sporta veidos joprojām ir pieejamas salīdzinoši maz zinātniskās publikācijas. Ekipējuma modernizēšana un nemitīga rekordu uzlabošana ļauj domāt, ka pētniecība šo sporta veidu jomā intensīvi attīstās, bet rezultāti reti tiek atspoguļoti publiski pieejamos darbos. Platzner un kol. atzīmē, ka Vācijā XX gadsimta beigās – XXI gadsimta sākumā veikti daudzi pētījumi kamaniņu sporta jomā, bet gandrīz neviens no tiem nav publicēts. [80] Pēdējo 40 – 50 gadu laikā „slīdēšanas” sporta veidu jomā iznākuši tikai daži desmiti zinātnisko rakstu. Līdz ar to šie sporta veidi joprojām paliek ļoti maz izpētīti gan no fizioloģijas, gan no sporta biomehānikas, gan arī no citu zinātņu nozaru pozīcijām. Lielākā daļa no pieejamām publikācijām satur laika un ātruma parametru analīzi pēc informācijas sacensību protokolos, sportistu antropometrisko rādītāju statistisko apkopojumu un fizisko spēju testu aprakstus. Zinātniskās diskusijas par kamanu konstrukcijas optimizācijas iespējām un rekomendācijas aerodinamikas uzlabošanai publicētas tikai attiecībā uz bobsleju.

Autori, kas publicējuši pētījumus par bobsleju, skeletonu un kamaniņu sportu, secinājuši, ka šajos sporta veidos finiša laiku iespaido vairāki faktori, kurus var iedalīt trīs kategorijās: aprīkojuma-atkarīgie faktori (piemēram, slīdes berzes koeficients starp sliecēm un ledu), sportista-atkarīgie faktori (sportista fiziskā sagatavotība, kamanu vadīšanas iemaņas, trases pārzināšana u.c.) un apkārtējās vides un ārējie faktori (gaisa un ledus temperatūra, nokrišņi, ledus kvalitāte u.c.). [14, 69, 113]

Analizējot bobsleja sacensību protokolu informāciju Morlock un Zatsiorsky pierādīja, ka komandas starta numurs būtiski ietekmē tās rezultātu: sportistiem, kas startē vēlāk, jābrauc pa bojātu un sagrieztu ledus virsmu, līdz ar to pasliktinās kamanu slīdēšana un samazinās to ātrums. [69] Vēlāk FIBT starta secības noteikumi starptautiskās sacensībās tika mainīti. Pašreizējie FIL noteikumi paredz, ka pirmajā sacensību braucienā starta secību nosaka sportista pozīcija FIL rangā pēc iepriekšējiem rezultātiem (no augstākās vietas uz zemāko), bet otro braucienu ciklu atklāj iepriekšējā brauciena 25. vietas ieguvējs (20. sievietēm un 18. divniekiem); līderis pēc pirmā brauciena, savukārt, uzstājas pēdējais. Starta kārtību bobslejā un skeletonā nosaka pēc līdzīga principa. [47, 48, 49]

Pēc Morlock un Zatsiorsky datiem 1988. gada Kalgari Olimpiskajās spēlēs temperatūra trasē, starta numurs un „iestumšanas laiks” (laiks no pirmās gaismas barjeras līdz otrās barjeras šķērsošanai, tālāk tekstā – starta laiks) kopā izskaidroja aptuveni 50% no finiša laika dispersijas vīriešu sacensībās četriniekiem bobslejā. Vēl agrāk Leonardi un kol. parādīja, ka startā zaudētais laiks bobslejā var trīskāršoties finišā. [63, 69] Pētīt 1994. gada Lillehammeres Olimpisko spēļu rezultātus Brüggemann un kol. secināja, ka šajās sacensībās bobslejā pilnai sportistu grupai ($n=172$ divniekiem un $n=118$ četriniekiem) ar starta laiku izskaidrojami aptuveni 77% no finiša laika dispersijas, bet kamaniņu sportā ($n=128$) aptuveni 55% (lai nodrošinātu mainīgo neatkarību, visos intervālos korelāciju aprēķināja starp šī intervāla laiku un atlikušo laiku līdz finišam). Analīzes rezultāti šādām nehomogēnām grupām atšķīrās no 15 labāko sportistu grupas analīzes rezultātiem. Autori norāda, ka šis starta laiks ir nepieciešamais priekšnosacījums, lai nodrošinātu pēc iespējas īsāku finiša laiku, bet 15 labāko sportistu grupā starta laiks viennozīmīgi neizšķir uzvarētāju. Kamaniņu sportā starta posma beigu ātruma ietekme uz finiša laiku statistiski netika pierādīta (bobslejā korelācija starp šiem rādītājiem pastāv abās disciplīnās). Stiprāko kamaniņu braucēju grupā nozīmīgāks izrādījās izteikti likumots un tehniski sarežģīts Lillehammeres trases posms starp 6. un 12. virāžu, kurš prasa no sportistiem ļoti labas kamanu vadīšanas iemaņas. Pētījuma nolūkiem trasē fiksēja starta laiku un laiku 15 intervālos (pašreizējie FIL noteikumi aizliedz izvietot trasē papildus laika mērīšanas ierīces bez oficiāli atrunātajām); intervālu laika ietekme uz finiša laiku lielākā vai mazākā mērā pieauga līdz ar intervāla tuvošanos finišam. Tas bija novērots visām disciplīnām un sportistu grupām, taču katrai disciplīnai bija savas īpatnības. Autori uzsver, ka iegūtie rezultāti lielā mērā raksturo tikai konkrēto trasi un sacensības. [14, 47]

Arī skeletonā tika atrasti statistiski nozīmīgi korelācijas koeficienti starp starta un finiša laikiem. 2006. gadā Zanoletti un kol. publicēja 2002./2003. un 2003./2004. gadu sezonu starptautisko sacensību analīzes rezultātus. Izpētot kopumā 46 braucienus dažādās pasaules trasēs vīriešiem (izvēlēti tikai braucieni ar vairāk nekā 20 dalībniekiem) autori konstatēja, ka korelācijas koeficients ir zemāks nekā iepriekš publicētie koeficienti bobslejā un kamaniņu sportā un sastāda 0,48 (determinācijas koeficients $R^2 \approx 0,23$). Sievietēm 25 braucienos tajās pašās sezonās aprēķinātais korelācijas koeficients sastādīja 0,63 ($R^2 \approx 0,40$). Līdzīgi kā iepriekšējos pētījumos, par starta laiku tika pieņemts pirmā intervāla laiks; šo laiku sacensību protokolā uzrāda kā starta laiku, bet reāli starts sportistiem sākas vēl pirms hronometrs uzsāk laika atskaiti (skat. 1.1.3. apakšnodaļu).

Zanoletti un kol. darbā aprēķinātie otrā brauciena korelācijas koeficienti gan vīriešiem, gan sievietēm bija nedaudz zemāki, nekā pirmā brauciena koeficienti, kas saistīts ar noslēdzošā braucienā dalībnieku grupas homogenitātes pieaugumu salīdzinājumā ar pirmo braucienu. Autori norāda, ka statistiski nozīmīga sakarība starp izmaiņām starta laikos 1. un 2. sacensību braucienos un atbilstošām izmaiņām finiša laikos nav pierādīta. Kopumā Zanoletti un kol. rezultāti apstiprina Brüggemann un kol. secinājumu, ka starp labākajiem sportistiem starta laiks viennozīmīgi neizšķir uzvarētāju. [14, 113] Bullock un kol. 2008. gadā publicēja nedaudz zemākus korelācijas koeficientus starp starta un finiša laikiem skeletonā sievietēm un atzīmēja, ka dažās trasēs teicama rezultāta sasniegšanai spēja vadīt kamanas slīpajā trases daļā un izvēlēties ārējiem apstākļiem atbilstošu ekipējumu ir svarīga ne mazāk par labu startu. Autori arī norāda, ka dažādās trasēs intervālu ietekme uz kopējo laiku ir atšķirīga, kas saskaņojas arī ar promocijas darba autores pētījumu rezultātiem. [17, 34] Fedotovas 2009. gada pētījumā aprēķinātie starta un finiša laiku korelācijas koeficienti kamaniņu sportā vīriešiem Vistleras trasē sastāda 0,46, bet Leikplesidas trasē 0,18. Starta posma pārvarēšana aizņem ilgāku laiku Vistleras trasē: aptuveni 7% no visa brauciena laika. Leikplesidas trasē šis posms ir īsāks un aizņem tikai 3% no kopējā laika. Darbā atzīmēts, ka pavisam jaunajā un līdz ar to slikti pazīstamajā Vistleras trasē korelācijas koeficienti visos posmos ir augstāki nekā labi pazīstamajā Leikplesidas trasē, bet netiek novērota tieša sakarība starp intervāla garumu un tā ietekmi uz finiša laiku (korelācija aprēķināta starp intervāla laiku un līdz finišam atlikušo laiku). [34]

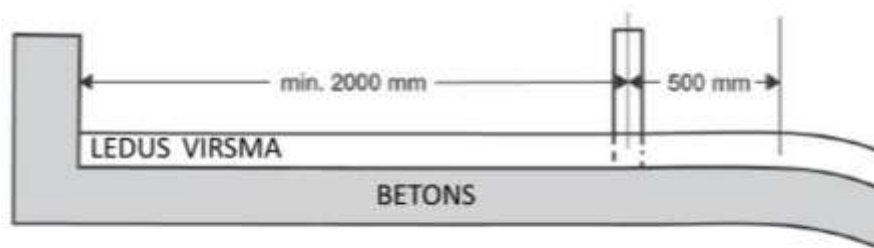
Apskatīto pētījumu rezultāti rāda, ka visos „slīdēšanas” sporta veidos laiks starta posmā statistiski mēreni korelē ar finiša laiku, un koeficienti variē atkarībā no trases un citiem ārējiem apstākļiem. Ņemot vērā sekundes simto un tūkstošo daļu izšķirošo lomu rezultātam, jau neliela startā iegūtā priekšrocība var palīdzēt sportistam ievietoties augstākā pozīcijā finišā, un tas pamato sportistu un treneru pastiprinātu uzmanību starta izpildes tehnikas pilnveidošanai.

Skeletonā un bobslejā starta izpilde līdzinās sprinta skrējienam, kas ir viena no labi izpētītām disciplīnām. Pēc Sands un kol. datiem augstākās klases sportisti skeletona startā var sasniegt 70 līdz 85% no sava ātruma parastajā 30 m sprintā. Tas lielā mērā arī nosaka starta pilnveidošanas treniņu raksturu. [88] Kamaniņu starta specifikas dēļ to ir grūti salīdzināt ar kādu citu, labāk izpētītu sporta veidu, bet paša sporta veida zinātniskā bāze ir nepilnīga. Starta biomehāniskie aspekti praktiski nav atspoguļoti literatūrā, un šī sporta veida kinemātikas un dinamikas analīze rada interesi treniņu kvalitātes celšanas griezumā.

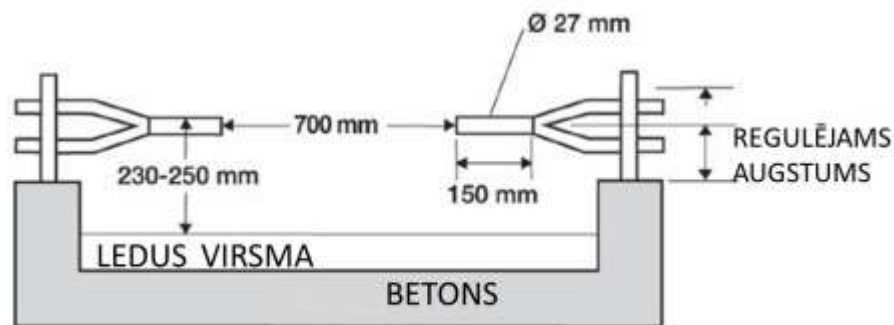
1.1.3. Starta izpildes īpatnības kamaniņu sportā

Starts ir pirmais sarežģītais un svarīgais kamaniņu sporta tehnikas elements. Starta posms ir vienīgais posms, kurā sportists var aktīvi iesaistīties kamanu paātrināšanā, tādēļ vairums sportistu un treneru uzskata to par būtisku faktoru kopējā brauciena rezultāta uzlabošanai. Starta rekordi pat tiek oficiāli reģistrēti un paziņoti galvenajās starptautiskajās sacensībās (Pasaules kauss, Pasaules čempionāts, u.c.), kaut gan starta rekorda ieguvējs nav vienmēr arī brauciena līderis. Ledus trases konstrukcijas īpatnību dēļ vislielākā iespēja kontrolēt sportistu darbību treneriem ir tieši startā. Sportisti strādā pie starta tehnikas uzlabošanas ne tikai pašā trasē, bet arī izmantojot citas sporta konstrukcijas, piemēram, mākslīgā ledus estakādes, mehāniskos starta imitatorus, skrituļkamanu estakādēs u.c. [50, 61, 80, 84] Starta svarīgumu apstiprinošie zinātniskie pētījumi apskatīti augstāk, 1.1.2. apakšnodaļā. Šajā apakšnodaļā izskatīsim tehniskos, biomehāniskos un fizioloģiskos kamaniņu starta aspektus, kas zināmas no literatūras un prakses.

Kamaniņu trases starta estakādes uzbūve ir atrunāta FIL noteikumos. Sportisti uzsāk startu estakādes horizontālajā daļā, kas nodrošina iespēju atrasties kamanās sēdus. Horizontālās platformas garumam līdz starta rokturiem jābūt vismaz 2 m, bet pēc starta rokturiem un līdz trases slīpās daļas sākumam – 50 cm (1.2. attēls). Starta rokturi ir paredzēti rāviens izpildei, lai iegūtu sākotnēju kamanu paātrinājumu. Rokturu augstums virs ledus ir 23 – 25 cm, attālums starp rokturiem 70 cm, roktura garumam jābūt vismaz 15 cm, diametrs sastāda 27 mm (1.3. attēls). Tā kā ledus kārtas biezums trasē var būt mainīgs, tad rokturu stiprināšanas mehānismam jābūt regulējamam, lai varētu pielāgot rokturu augstumu konkrētiem apstākļiem. Starta rokturiem jābūt pietiekoši stingriem, lai pie rāviens izpildes tie nelocītos; rokturu rievota augšējā virsma samazina sportistu plaukstu slīdēšanu. Starta estakādes gradientam jābūt 20 – 25%, bet garumam starp 10 un 30 m, ieejas leņķis pret trases asi nedrīkst pārsniegt 8°.



1.2. att. Kamaniņu trases starta platformas shēma, skats no sāna [47]



1.3. att. Kamaniņu trases starta platformas shēma, skats no aizmugures [47]

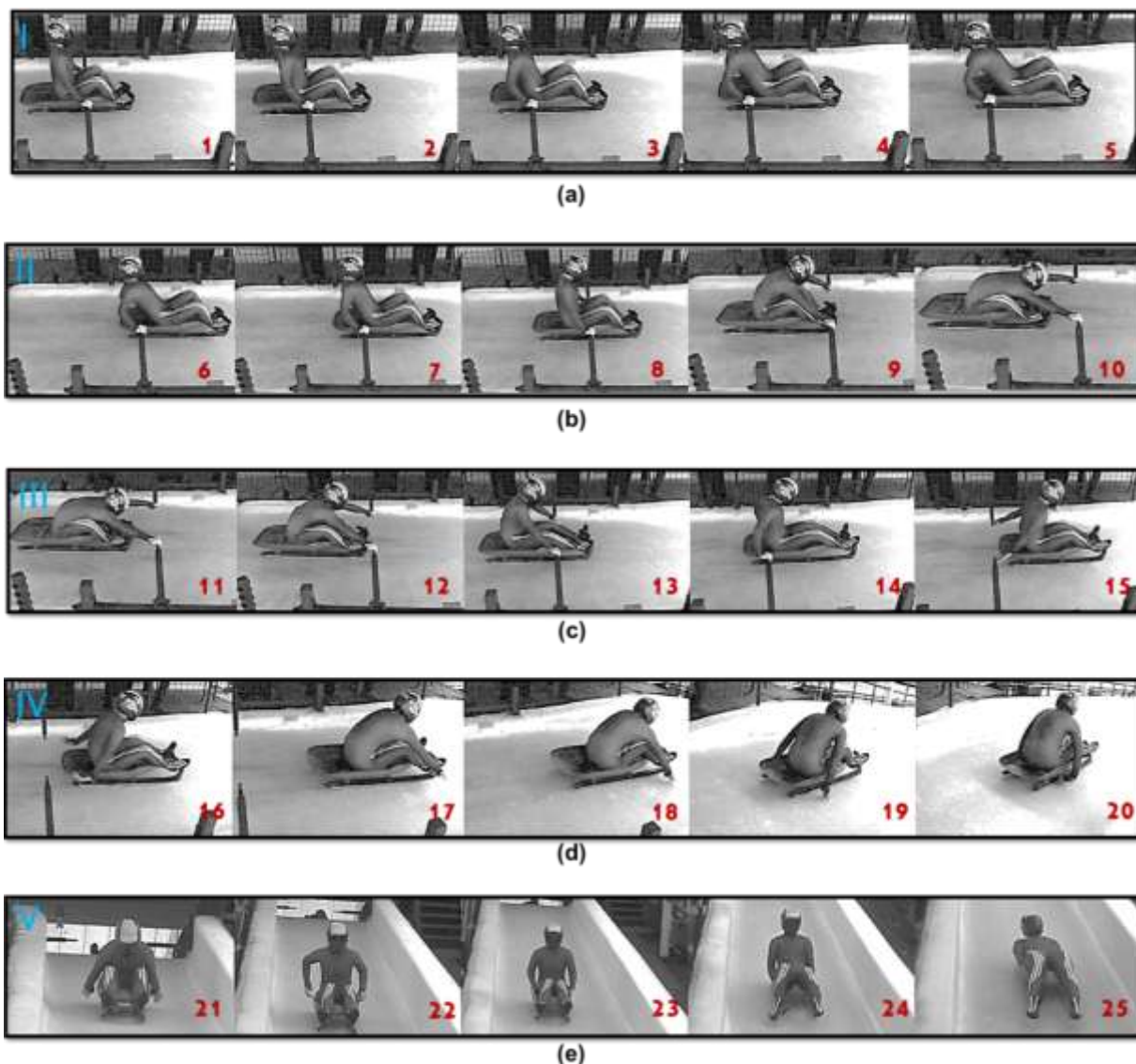
Starta signālu trasēs nodrošina akustiski un vizuāli. Pēc starta signāla vieninieku ekipāžām jāatstāj starta platforma 30 sekunžu laikā, bet divnieku ekipāžām – 40 sekunžu laikā. Saskaņā ar noteikumiem starts ir jāizpilda ar rāvienu, bet „lidojošais” starts nav pieļaujams. Startu ieskaita, ja nozīmētā laikā sportists izpildījis starta rāvienu un iekustējies kamanās. Pirms kustības uzsākšanas sportists atrodas kamanās sēdus, pēdas parasti atbalstītas pret slieču priekšējo daļu. Starta rokturus izmanto, lai veiktu starta rāvienu un atgrūstos, kas ļauj uzsākt kustību ar iespējami lielāku ātrumu. Pirms starta rāvienu sportisti parasti ieslidina kamanas, kustoties uz priekšu un atpakaļ starta platformā un turoties aiz rokturiem.

Pēc Kempe un Thorhauer [51] startu kamaniņu sportā iedala piecās fāzēs:

- (1) kamanu iestumšana uz priekšu;
- (2) kamanu kustība uz aizmuguri (šo fāzi sauc arī par „kompresiju”);
- (3) atgrūšanās no starta rokturiem;
- (4) vairākas atgrūšanās no ledus ar pirkstiem vai plaukstām;
- (5) iegulšanās kamanās un braukšanas pozīcijas ieņemšana.

1.4. attēls demonstrē šo starta fāžu kinogrammas. Pirmās trīs fāzes notiek gandrīz pilnībā estakādes horizontālajā daļā, brauciena laiks šajās fāzēs vēl netiek reģistrēts, jo pirmais fotoelementu pāris atrodas vairākus metrus pēc rokturiem. Brauciena laika reģistrācija sākas tikai ceturtajā fāzē, taču sportistiem ir jāuzsāk brauciens īsi pēc signāla „Trase brīva”, un starts tiek ieskaitīts tikai ja sportists iziet no rokturiem ar grūdienu.

Pirmajā fāzē sportisti izvirza kamanas pēc iespējas tālāk uz priekšu, lai iegūtu lielāku attālumu ieskrējienam. Nereti šīs fāzes beigās sportisti apstājas uz dažām sekundēm, tāpēc pirmās divas starta fāzes parasti nevar izskatīt kā vienu nepārtrauktu kustību.



1.4. att. Kamaniņu sporta starta fāžu kinogramma

(a) 1. fāze – kamanu iestumšana uz priekšu; (b) 2. fāze – ekscentriskā „kompresijas” fāze; (c) 3. fāze – atgrūšanās no starta rokturiem; (d) 4. fāze – vairākas atgrūšanās no ledus; (e) 5. fāze – braukšanas pozīcijas ieņemšana.

Otrā fāze ir ekscentriskas muskuļu darbības fāze: sportisti ieslidina kamanas uz aizmuguri, maksimāli noliecoties pie kājām un iztaisnojot rokas. Trešajā fāzē notiek pats starta rāviens; šī ir muskuļu koncentriskas darbības fāze. Otrā un trešā starta fāzes kopā nodrošina muskuļiem iespēju iziet pilnu iestiepšanas–saraušanās ciklu, kas ir efektīvāk nekā tīri koncentrisks darbības režīms. Pēc Platzner un kol. datiem otrās fāzes ātrums ir viens no svarīgajiem faktoriem laba starta rezultāta sasniegšanai.

Galvenās starta rāvienā iesaistītās muskuļu grupas ir muguras (erector spinae, latissimus dorsi) un roku muskuļi (biceps brachii, triceps brachii, pectoralis major, deltoideus, trapezius). Sportistiem jācenšas sasniegt maksimālo ātrumu trešās fāzes beigās, tajā brīdī, kad rokas atraujas no starta rokturiem, lai izmantotu estakādes slīpo daļu turpmākam paātrinājumam. Ja maksimālais ātrums ir sasniegts pirms rokturu atlaišanas, kamanas paspēj nobremzēt vēl pirms slīpā posma sasniegšanas, un tas negatīvi ietekmē starta laiku. Ātruma samazinājums rokturu atstāšanas brīdī var norādīt uz tehniskām kļūdām vai vājumu roku iztaisnotājmuskuļos un plaukstu saliecējmuskuļos, kas darbojas pēdējā atgrūdienā no rokturiem. Platzer un kol. novēroja negatīvu korelācijas koeficientu ($-0,845$) starp ātrumu 3. fāzes beigās (kad notiek starta rokturu atlaišana) un pilnu starta laiku. Otrās fāzes ātrums mēreni korelēja ar 3. fāzes maksimālo un beigu ātrumu (korelācijas koeficienti atbilstoši $0,542$ un $0,626$). [51, 59, 80]

Ceturtajā fāzē, kas norisinās jau estakādes slīpajā daļā, sportisti vēl mēģina paātrināt kamanas, vairākas reizes atgrūžoties no ledus virsmas ar plaukstām vai pirkstiem, maksimāli iztaisnojot rokas uz priekšu. Pētījumu dati liecina, ka šī fāze sniedz 23% ieguldījumu kopējā starta izpildē. Lai uzlabotu pirkstu saķeršanos ar ledu, sportistu lieto cimdus ir naglotiem pirkstu galiem. Izpildot ceturtais fāzes elementus sportisti sākumā izstiepj rokas uz priekšu un ar sitienu iestiprina pirkstgalus ledus virsmā, tad pievelkas tuvu pie plaukstām un visbeidzot atgrūžas no ledus. Šajās kustībās mugura jānotur taisna, pirksti, plaukstas un elkoņi stingri, rokas jātur pēc iespējas tuvu kamanām. Pēdējam atgrūdienam no ledus seko piektā starta fāze – braukšanas pozīcijas ieņemšana kamanās (guļus uz muguras), kas jāpabeidz pirms trases pirmās virāžas. Uz braukšanas pozīcijas ieņemšanas brīdi jābūt sasniegtam starta ātruma maksimumam. [61, 84]

Starta tehnika variē antropometrisko rādītāju atšķirības dēļ. Platzer un kol. parādīja, ka korelācijas koeficients starp sportistu augumu un 3. fāzes maksimālo ātrumu ir $0,532$, bet starp svaru un maksimālo ātrumu $0,405$. Tas norāda, ka svarā un augumā lielākiem sportistiem ir labākas izredzes kamaniņu startā. Šo pieņēmumu daļēji apstiprina arī Statkeviciene pārskats par kamaniņu braucēju antropometriskajiem rādītājiem 1988. gada Kalgari Olimpiskajās spēlēs. Šajās sacensībās labākus rezultātus sasnieguši augumā garāki un smagāki sportisti. Lielāks svars dod sportistiem priekšrocību, jo kamanu svars (23 kg) relatīvi pret ķermeņa masu ir mazāks. Savukārt augumā garākiem sportistiem iespējami ir garāks paātrinājuma ceļš starta rāvienā. Gūžu un jostas vietas lokanības ietekme uz starta ātrumu šobrīd praktiski nav pierādīta, kaut gan labāka lokanība arī pagarina paātrinājuma ceļu starta rāvienā. [80, 96, 97]

Starpsezonu laikā (sporta sezona pēc FIL noteikumiem sākas 1. jūlijā un ilgst līdz 30. jūnijam, bet galvenie starti notiek no oktobra līdz februārim) sportisti pārsvarā koncentrējas uz starta uzlabošanas treniņiem. Analizējot kamaniņu startu ietekmējošus fizioloģiskos faktorus, Platzer un kol. secināja, ka spēks vilkšanā guļus ir rādītājs, kas vislabāk raksturo sportistu spēju spēcīgam startam. Sportisti izpildīja svaru stieņa izometrisko vilkšanu ar elkoņu leņķi 90°; šī testa rezultātu korelācijas koeficients ar maksimālo ātrumu 3. fāzē bija 0,735, bet ar 3. fāzes beigu ātrumu 0,648. Autori norāda, ka spēks vilkšanā guļus var būt izmantots kā atlases kritērijs kamaniņu sportā, līdzīgi kā sprinta ātrums tiek izmantots bobslejā un skeletonā. Pie citiem svarīgiem fizioloģiskiem rādītājiem, kas nepieciešami veiksmīgam startam, tiek norādīti spēks muguras iztaisnošanā un tvēriena spēks. Tvēriena spēks atspoguļo plaukstu saliecējmusku spēku; plaukstu saliekšana nodrošina pēdējo grūdienu pret starta rokturiem, kas nepieciešams, lai palielinātu vai vismaz saglabātu kamanu ātrumu. Plaukstu muskuļu spēka nozīme reti tiek novērtēta kamaniņu sporta literatūrā, tomēr arī Kempe un Thorhauer savā darbā izskata roku muskulatūras lomu startā, ieskaitot plaukstu saliecējmusku. [47, 51, 80]

Kamaniņu sportā starta rāviens ir ne tikai muguras, bet arī gūžas iztaisnotājmusku darbības rezultāts, un sportistiem jātrenē arī tādas muskuļu grupas, kā augšstilba aizmugurējie muskuļi (mūsdienu angļu valodas literatūrā visbiežāk dēvēti „hamstrings”: *musculus semimembranosus*, *musculus semitendinosus* un *musculus biceps femoris*) un sēžas muskuļi (*gluteus maximus*, *gluteus medius* un *gluteus minimus*). Kearney un kol. [50] 2000. gadā publicēja ASV Nacionālās kamaniņu sporta izlases atlases testu, kas sastāv no 8 vingrinājumiem (papildus tam pārbaudē ir iekļauts kamaniņu starts uz speciāli aprīkotās estakādes). Izmantojamie atlases vingrinājumi to izpildes secībā ir šādi: lēciens tālumā no vietas, atspiešanās no grīdas 30 sekunžu laikā, lokanības pārbaude sēžot un sniedzoties, pievilkšanās 15 sekunžu laikā, pacēlieni 60 sekunžu laikā vēdera preses muskulatūras pārbaudei, pildbumbas mešana tālumā aizmuguriski un divas skriešanas disciplīnas (30 un 300 m). Brüggemann un kol. [14] norāda, ka nobrauciena laikā sportistu ķermenis tiek pakļauts lielām pārslodzēm, kas īpaši ietekmē kakla un kāju muskulatūru, tāpēc treniņos jānodrošina šo muskuļu grupu nostiprināšana. Platzer un kol. darba kopējais secinājums ir, ka treniņu process ir jāorganizē tā, lai veicinātu sportistu maksimālā absolūtā spēka pieaugumu, taču jāizvairās no pārmērīga ķermeņa svara un apjoma attīstīšanas, jo tas pasliktina ķermeņa aerodinamiskās īpašības. [14, 50, 80]

Gatavojoties sacensībām, sportisti strādā ne tikai pie fiziskās sagatavotības, braukšanas un starta tehnikas uzlabošanas, bet arī meklē iespējas optimizēt kamanas un slieces, lai panāktu labāku slīdēšanu un aerodinamiskās īpašības. Bobslejā pēdējos gados iznāca vairākas publikācijas ar rekomendācijām kamanu aerodinamisko īpašību uzlabošanai, taču kamaniņu sportā nacionālās izlases pārsvarā tur savu kamanu konstruktīvās īpatnības noslēpumā. [28, 29, 70, 81, 104]

Nedaudzi apskatītie zinātniskie darbi praktiski izsmel šobrīd pieejamo literatūru kamaniņu starta jomā. Esošo avotu analīze liecina, ka otrā un trešā starta fāzes (kamanu kustība uz aizmuguri un tai sekojošs starta rāviens un izešana no starta rokturiem) uzskatāmas par noteicošajām kamaniņu starta izpildē, bet sīkāk starta tehnikas detaļas literatūrā netiek atspoguļotas. Radniecīgos sporta veidos – bobslejā un skeletonā –ir pieejams vairāk informācijas starta tehnikas jomā. Daži autori veikuši bobsleja un skeletoņa starta kinemātikas analīzi un parādījuši, ka sportistu skrējiena īpatnības ar kamanām būtiski neatšķiras no parastā sprinta skrējiena. Tādēļ, kā jau minēts, daudzi vieglatlētikas skriešanas disciplīnās pieejami pētījumi ir noderīgi arī skeletoņa un bobsleja starta izpildes uzlabošanai. Kamaniņu startam, savukārt, ir grūti rast analogijas, un svarīgāko iezīmju noteikšanai nepieciešami specifiskie pētījumi. [53, 88]

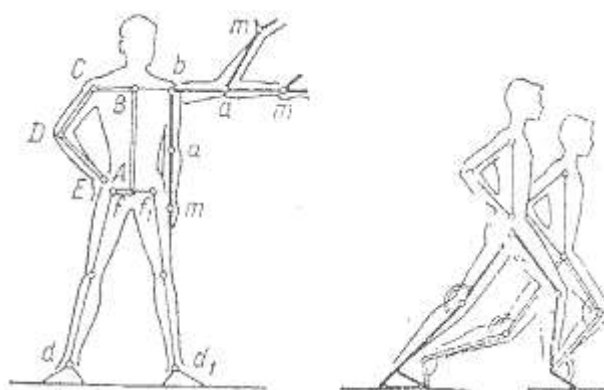
Sacensību protokolu datu analīze liecina, ka Latvijas izlases sportisti starta izpildē zaudē labākajiem pasaules sportistiem. It īpaši tas skar kamaniņu sporta izlasi – pēdējo trīs sporta sezonu lielākajās sacensībās (Pasaules čempionāti un Olimpiskās spēles) Latvijas izlases pārstāvji startā zaudējuši attiecīgo braucienu līderiem līdz pat sekundes desmitdaļai, kas ir ievērojams zaudējums tik ātrā sporta veidā kā kamaniņas. Arī skeletonā un bobslejā šajā pašā periodā Latvijas sportisti atpalikuši no braucienu līderiem, bet 2009. gada Pasaules čempionātā skeletonā un 2011. gada Pasaules čempionātā bobslejā tieši Latvijas izlases pārstāvji ieguvuši labākos starta laikus. [140] Starta laika uzlabošana ir šķietami perspektīvs ceļš kopējā brauciena rezultāta celšanai visos „slīdēšanas” sporta veidos, un kamaniņu sportā tas ir īpaši aktuāli. Ar 2009./2010. gada sporta sezonu iesākti kamaniņu izlases starta treniņi mākslīgā ledus estakādē un intensīva vizuālās informācijas sniegšana starta treniņu atgriezeniskajā saitē. Salīdzinājumā ar iepriekšējo gadu sezonām startā laikā novērojams atpalikuma samazinājums no brauciena līderiem (gan vīriešu un sieviešu, gan divnieku ekipāžās). Sportista ķermeņa un kamanu veidotās kinemātiskās ķēdes darbības analīze svarīgākajās starta fāzēs savienojumā ar uzlabotu vizuālo informāciju ir nākamais solis starta kustību pilnveidošanā. Kā viena no piemērotākām metodēm šo uzdevumu risināšanai mūsdienu literatūrā ir uzskatāma datora modelēšana. [6, 111]

1.2. Kinemātiskās ķēdes sporta kustībās

Sporta biomehānikā kinemātiskā pāra un kinemātiskās ķēdes jēdzieni ir ienākuši no mašīnu un mehānismu teorijas, un pēc D. Donskoja piezīmes gadījumā ar dzīvajiem organismiem pareizāk būtu lietot vārdu „biokinemātiskā ķēde” (vai „pāris”). Mūsdienu angļu valodas sporta biomehānikas literatūrā šo jēdzienu apzīmēšanai ir pieņemts lietot gan terminu „kinetic” („kinetic pair”, „kinetic chain”), gan „kinematic” („kinematic chain/pair”). Šajā darbā mēs pieturēsimies pie LZA Terminoloģijas komisijas apstiprinātā termina „kinemātiskā ķēde” (vai „pāris”), bet gadījumos, kad būs nepieciešams atšķirt tehnisko mehānismu no dzīvā organisma, lietosim vārdu „biokinemātiskais”. [114, 124, 145]

Par kinemātisko pāri sporta biomehānikā sauc divu kaulu kustīgu (kinemātisku) savienojumu. Savienojuma uzbūve un muskuļu regulējošā darbība nosaka savienojumā iespējamās kustības. Tehniskos mehānismos detaļu kustību iespējas parasti ir pilnībā atkarīgas no savienojuma veida, bet dzīvajos organismos ķermeņa daļu savienojuma veids nenosaka kustību iespējas pilnībā. Muskuļu darbība palielina segmentu kustīgumu savienojumos, un arī kustību regulācija paliek sarežģītāka nekā tehniskos mehānismos. Kauli biokinemātiskajā pārī tiek saturēti kopā vai nu pateicoties to formai (ģeometriski slēgti pāri, līdzīgi kā gūžas locītava – articulatio coxae), vai nu ārējo spēku iedarbības dēļ (tā, kā tas notiek, piemēram, pleca locītavā – articulatio humeri, kuru kopā satur apkārtējie muskuļi un saites). Cilvēka ķermenī gandrīz visi kinemātiskie pāri pēc savienojuma veida ir griezes (šarnīra) savienojumi, maza daļa ļauj savienotiem segmentiem slidēt vienam relatīvi pret otru, bet tikai viens pāris – apakšstilba un potītes locītava (articulatio talocruralis) – ļauj veikt spirālveidīgu kustību.

Ar kinemātisko ķēdi sporta biomehānikā saprot vairāku biokinemātisko pāru savienojumu; kauli tiek pieņemti par cietiem (neelastīgiem) ķēdes segmentiem. Kinemātiskās ķēdes var būt sazarotas vai vienkāršas un atvērtas vai noslēgtas. Vienkāršajās ķēdēs katrs segments ir iekļauts ne vairāk kā divos kinemātiskos pāros. Sazarotā ķēde satur vismaz vienu segmentu, kas iekļauts vairāk nekā divos pāros vienlaicīgi (1.5. attēls). Atvērtajās ķēdēs ir brīvais (gala) segments, kas pieder tikai vienam kinemātiskam pārim. Šādās ķēdēs nav izslēgta iespēja veikt izolētu segmenta kustību, kaut gan parasti kustības vienlaicīgi notiek vairākos segmentos. Noslēgtajās ķēdēs brīvā segmenta nav, un izolētas segmenta kustības nav iespējamās – kustībā vienmēr vienlaicīgi iesaistās arī citi ķēdes posmi.



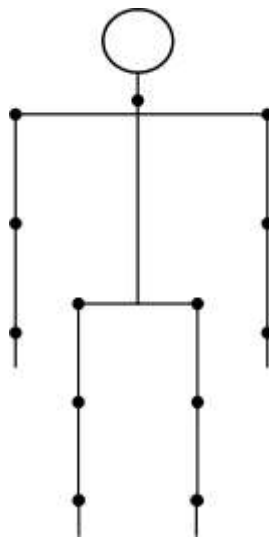
1.5. att. Kinemātisko ķēžu piemēri cilvēka ķermenī [124]

Atvērtās ķēdes var kļūt par noslēgtām, ja brīvais loceklis iegūst savienojumu ar citu segmentu (tieši, vai arī ar kāda ārējā ķermeņa starpniecību). Daudzām cilvēka kustībām ir raksturīga īslaicīga noslēgto ķēžu veidošanās no atvērtajām ķēdēm, piemēram, atbalsta periodā gaitā. Kamaniņu starta laikā sportista plaukstas sākumā noslēdz kinemātisko ķēdi caur starta rokturiem, bet pēc iziešanas no starta platformas un līdz iegulšanai kamanās – caur ledus virsmu īslaicīgos pirkstu vai plaukstu atbalsta periodos. Kājas, savukārt, noslēdz ķēdi caur pēdu atbalstu pret kamanu slieču priekšējo daļu, bet ja pēdas izslīd no kamanām, tad notiek pēkšņa ķēdes pāreja no noslēgtas uz atvērtu.

Ar biomehānisko sistēmu sporta biomehānikā saprot vienkāršotu cilvēka ķermeņa modeli, kas pielietojams kustību likumsakarību pētīšanai. Lai analizē būtu iespējams pielietot teorētiskās mehānikas metodes, parasti izdara sekojošus pieņēmumus:

1. Modeļa segmenti ir absolūti cieti ķermeņi;
2. Modeļa segmentu ģeometrija sakrīt ar atbilstoša cilvēka ķermeņa segmenta parametriem;
3. Modeļa posmi ir savienoti ideālos kinemātiskos pāros.

Divu segmentu plakaniskā ķēde ir visvienkāršākais cilvēka rokas vai kājas modelis. Tādā modelī izslēdz kustību iespējas plaukstā vai pēdā. Izšķir skeleta (antropomorfos) un funkcionālos kinemātiskos modeļus. Antropomorfos modeļos ķermeņa segmentus modelē kā locītavu vietās savienotus cietus posmus. Funkcionālos modeļos ķermeņa segmentus aizstāj ar grafa mezgliem, bet locītavas ar mezglus savienošiem lokiem.



1.6. att. Cilvēka ķermeņa vispārīgais kinemātiskais modelis [114]

Vispārīgais antropomorvais cilvēka ķermeņa kinemātiskais modelis ar 16 segmentiem ir parādīts 1.6. attēlā. Viens no šī modeļa trūkumiem ir mugurkaula modelēšana ar vienu veselu segmentu, kas neatspoguļo reālo mugurkaula kustīgumu. Izmantojot papildus savienojumus mugurkaula segmentā, ir iespējams uzlabot modeli, bet pilnībā modelēšanas problēmu tas neatrisina. No otras puses, ja vērā ņemtu visus cilvēka ķermeņa kustīgos kaulus, kuru skaits ir aptuveni 148, un visas locītavas, kuras ir aptuveni 147, tad kopējais cilvēka skeleta modeļa brīvības pakāpju skaits būtu 244. Veidojot cilvēka ķermeņa kinemātisko modeli jāizvēlas tāds kustīgu savienojumu skaits, kas ir pietiekoši labi atbilst modelējamai sistēmai, bet nepārslogo to ar liekām brīvības pakāpēm. [114, 115, 121, 127]

Cilvēka locītavu ģeometrija ir sarežģīta, no dabas to virsmas ir nevienmērīgas un nevar būt precīzi aprakstītas ar vienkāršām ģeometriskām virsmām. Tāpēc arī locītavu modelēšanā ir jāizvēlas starp vienkāršību un precizitāti. Parasti pieņem, ka cilvēka locītavām ir viena, divas vai trīs rotācijas brīvības pakāpes. Katras locītavas maksimālais brīvības pakāpju skaits ir 6, bet ja neņem vērā virzes kustības pašā locītavā, kuras parasti pieņem par neievērojami mazām, tad maksimālais brīvības pakāpju reducējas līdz 3. Rotācijas brīvības pakāpes galvenajās ķermeņa locītavās ir uzskaitītas zemāk. Apakšdelma un plaukstas locītava, articulatio radiocarpea, un apakšstilba un potītes locītava, articulatio talocruralis, ir nosacīti vienotas locītavas. Anatomiski tās ir veidotas no vairākām sīkākām locītavām, bet ķermeņa kinemātiskajā modelī sīkāku locītavu kopu ir ērtāk pieņemt par vienu locītavu. Dažām brīvības pakāpēm ir uzlikti papildus anatomiskie ierobežojumi, kas regulē rotāciju amplitūdu locītavā.

Brīvības pakāpes galvenajās ķermeņa locītavās:

- pleca locītava (articulatio humeri) – 3;
- elkoņa locītava (articulatio cubiti) – 1, rotācija ap locītavas laterāli-mediālo asi;
- apakšdelma un plaukstu locītava (articulatio radiocarpea) – 3;
- gūžas locītava (articulatio coxae) – 3;
- ceļa locītava (articulatio genus) – 2, rotācija ap locītavas laterāli-mediālo un garenisko asi;
- apakšstilba un potītes locītava (articulatio talocruralis) – 3.

Cilvēka kustības aparāta brīvības pakāpju skaits ir daudz lielāks, nekā nepieciešams atsevišķas kustības veikšanai, un lai precīzi izpildītu plānoto kustības uzdevumu, jāpārvar liekās mehāniskās brīvības pakāpes – to sauc par Bernšteina uzdevumu. Pēc būtības kustību koordinācija ir lieko brīvības pakāpju ierobežošana: centrālā nervu sistēma visas kustības garumā nemainīgi ierobežo tikai svarīgākās brīvības pakāpes, bet citas netiek kontrolētas stingri. [114, 115, 121, 127]

Mašīnu un mehānismu teorijā par vispārinātu koordināti sauc katru neatkarīgu koordināti, kas viennozīmīgi nosaka visu (bio)mehānisma locekļu stāvokli pret nekustīgo locekli (statni). Kopējo kinemātiskās ķēdes brīvības pakāpju skaitu sauc par ķēdes kustīgumu, un tas ir vienāds ar vispārināto koordinātu skaitu. Ķēdes kustīgumu nosaka pēc Čebiševa-Grablera-Kutcbaha formulas:

$$F = 6(N - k) + \sum_{i=1}^k f_i, \quad (1.1.)$$

kur F – kinemātiskās ķēdes kustīgums;

N – kustīgo locekļu skaits;

k – locītavu (savienojumu) skaits;

f_i – i -tās locītavas brīvības pakāpju skaits.

Plakaniskajās sistēmās ir izslēgta virzes kustība gar plaknes normāli un pagrieziens ap divām asīm šajā plaknē, tādēļ Čebiševa-Grablera-Kutcbaha formula reducējas līdz sekojošam izskatam:

$$F = 3(N - k) + \sum_{i=1}^k f_i. \quad (1.2.)$$

Sporta kustībām nepieciešamais ķermeņa kinemātiskās ķēdes brīvības pakāpju skaits ir dažāds. Piemēram, akadēmiskajā airēšanā minimālais sistēmas laiva-sportists brīvības pakāpju skaits, kas nodrošina racionālu kustību, ir trīspadsmit. [85, 114, 121, 125]

Ķermeņa segmentu kinemātikas noteikšanai sporta biomehānikā bieži izmanto optoelektroniskās kustību analīzes metodes, bet kinemātiskā analīze, savukārt, bieži kalpo par sākuma punktu dinamikas apgrieztā uzdevuma risināšanai – spēku un momentu noteikšanai no kinemātiskiem ierakstiem. Sporta tehnikas uzlabošanas procesā svarīgu lomu spēlē atgriezeniskās saites informācija un tās iegūšanas ātrums [5, 61, 94], un vizuālās informācijas papildināšana ar kinemātiskiem, bet perspektīvā arī dināmiskiem rādītājiem, ir viens no iespējamiem treniņu kvalitātes celšanas virzieniem.

1.3. Kustību analīze mūsdienu sporta zinātnē

Kustību analīze (no angļu „Motion analysis”), pazīstama angļu valodas literatūrā arī kā „Motion capture” vai „Motion tracking”, ir objekta kustības reģistrēšana un šīs kustības pārvešana datorā modelī ar segmentu koordinātu rekonstrukciju un sekojošu kustības parametru izpēti. Šī ir izplatīta mūsdienu metodika, ko pielieto medicīnā, rehabilitācijā, sportā, automobiļu ražošanā, ergonomikā, robotikā, izklaides sfērā u.c. nozarēs, kur ir nepieciešams iegūt datus par objektu kustības parametriem.

Pēc savas būtības optoelektroniskā kustību analīze ir modernizēta ciklogrāfijas metode, kuras pamatā ir attēlu apstrāde (mūsdienās pastāv arī citas metodes, piemēram, inerces sensoru metode, kad ķermeņa kustību dati ierakstās inerces sensoru iekšējā atmiņā un tad tiek pārnesti datorā; par izplatītākām un precīzākām tomēr joprojām paliek optoelektroniskās metodes). Ciklogrāfijas metodes pirmsākums saistīts ar franču zinātnieka Etjena Žila Marē (Étienne Jules Marey) un angloamerikāņu fotogrāfa Edvarda Meibridža (Eadweard Muybridge) darbiem. Abi zinātnieki jau XIX gadsimta beigās ar fotoaparātu palīdzību reģistrēja dzīvnieku un cilvēku kustību fāzes.



1.7. att. E. Muybridge, „Athlete. Rowing”, ap 1887. [72]

XIX – XX gadsimtu robežā E. Meibridžs publicēja savus darbus, ilustrējot cilvēka un dzīvnieku lokomocijas (1.2. attēlā redzama viena no ilustrācijām). Fiziologs N.A. Bernšteins XX gadsimta divdesmitajos gados pilnveidoja ciklogrāfijas metodi un izveidoja kimociklogrāfijas un ciklogrammetrijas metodes, lai analizētu cilvēku kustības. Kimociklogrāfija ir optiska metode, kurā cilvēka ķermeni ar piestiprinātām atzīmēm vai lampiņām (marķieriem) reģistrē kustīgajā fotofilmā. Ciklogrammetrija ir iegūto ciklogrammu (marķieru trajektoriju) analīze. [121] Mūsdienu zinātnes nozarēs jēdziens „kustību analīze” gandrīz pilnībā ir aizstājis ciklogrāfijas, ciklogrammetrijas un līdzīgos jēdzienus. Kustību analīze apvieno sevī minētās metodes – tajā notiek gan kustību reģistrācija, vai „satveršana”, gan pati analīze. Analīzes rezultātā parasti iegūst datus par ķermeņa (vai aprīkojuma) segmentu savstarpējo izvietojumu, locītavu trajektorijām, pārvietojumu, ātrumu un paātrinājumu.

Pašreiz optoelektroniskajās metodēs kustības parasti reģistrē ar videokameru, nevis ar fotoaparātu vai kinokameru palīdzību. Vienas kameras izmantošana ļauj novērtēt punktu koordinātes plaknē (2D), bet pielietojot divas un vairāk kameras, var noteikt telpiskas punktu koordinātes (3D). Kustību analīzē izmanto dažāda tipa kameras. Videokameras, kas darbojas redzamajā gaismas diapazonā ļauj apvienot kvantitatīvās un kvalitatīvās kustības analīzes metodes, t.i. iespējams ne tikai veikt interesējošo parametru aprēķinus, bet arī vizuāli novērtēt kustības izpildes tehniku. Specializētajās kustību analīzes sistēmās bieži izmanto infrasarkanā gaismas diapazona videokameras.

Tās ieraksta tikai gaismu atstarojošu vai izstarojošu marķieru kustību, bet neļauj vizuāli novērtēt cilvēka darbības. Šādu kameru priekšrocība ir augsta ieraksta kadru frekvence un automātiska marķieru kartēšana programmatūrā.

Kustību reģistrācijas gaismas diapazona izvēle atkarīga no pieejamā aprīkojuma, pielietojamo marķieru tipa, mērījumu uzdevumiem, apkārtējās vides apstākļiem u.c. Marķieru izvietojums ir atkarīgs no pētījuma mērķiem, bet parasti marķierus izvieto uz cilvēka ķermeņa orientieriem, jeb pazīšanas zīmēm (angļu „body landmark”) – kaulu veidojumiem, kas ir labi sataustāmi zem ādas un atrodas kādas locītavas tuvumā (piemēram, 7. kakla skriemelis, kondiļi u.c.). Ir izveidoti dažādi marķieru izvietojuma modeļi, kas piemēroti vienam vai citam pētījuma mērķim (piemēram, Helen Hayes, vai Davis, marķieru izvietojums klīniskai gaitas analīzei). Starptautiskā Biomehānikas Sabiedrība ISB (International Society of Biomechanics) ir izstrādājusi rekomendācijas koordinātu sistēmas izvēlei cilvēka augšējās un apakšējās ekstremitātes kustību aprakstam. Šīs rekomendācijās iekļauj informāciju arī par vēlamo ķermeņa orientieru izmantošanu. Ar marķieru izvietojumu uz ādas ir saistītas vairākas problēmas. Piemēram, ķermeņa orientieri ne vienmēr sakrīt ar locītavu centriem, bet vairums aprēķinu modeļu paredz, ka ir zināma tieši locītavu centru kinemātika. Sarežģītu locītavu centru noteikšanai mūsdienu biomehānikā ir veltīti daudzi pētījumi, tie iekļauj gan matemātisko un datora modelēšanu, gan līķa materiāla izpēti, gan medicīniskās attēlošanas metodes. [19, 30, 33, 78, 92, 103, 108, 109]

Dažreiz ķermeņa segmentu kustību novērtēšanai marķierus neizmanto, bet kartē ķermeņa orientierus manuālā režīmā. Tādā gadījumā ir rekomendēts vienam un tam pašam operatoram kartēt punktus vairākas reizes, lai novērtētu punktu noteikšanas precizitāti. Daži autori uzskata, ka locītavu kustību aprakstīšana bez marķieru izvietojuma uz ķermeņa pazīšanas zīmēm neļauj novērtēt kustību variācijas. Taču precīza locītavu kustību noteikšana arī ar virsmas marķieriem ir biomehānikas sabiedrībā apstrīdams jautājums, jo ādas virsmas kustība ietekmē marķieru pozīciju un ienes trokšņus derīgās kustības signālā. Ādas virsmas pārvietojumi ir atkarīgi no vairākiem faktoriem, ieskaitot zemādas tauku slāņa biezumu, un nevar būt precīzi noteikti vai pilnībā novērsti. Vairāki autori precīziem kinemātikas aprēķiniem rekomendē izmantot magnētiskās rezonanses metodi, vai arī invazīvu marķieru izvietojuma tehniku – ar tapām iestiprinot marķierus locītavas kaulos (1.8. attēls). Praktiskajā pielietojumā abām šīm metodēm piemīt saprotami ierobežojumi. Sporta biomehānikā sportista ķermeņa locītavu un segmentu darbības novērtēšanai pārsvarā pietiek ar to precizitāti, ko iegūst ar virsmas marķieriem.



(a)



(b)

1.8. att. Atstarojošo marķieru izvietošana uz cilvēka apakšējās ekstremitātes

(a) marķieru stiprināšana uz ādas virsmas ar divpusējo līmlenti [147]; (b) marķieru izvietošana uz kaulā iestiprinātām tapām [54].

Ņemot vērā minētos ādas kustības traucējumus, punktu manuālai kartēšanai bez marķieriem ir arī zināmas priekšrocības, jo pieredzējis operators var pietiekoši labi noteikt ķermeņa orientieru lokalizāciju, bet netiek iespaidota sportista kustību brīvība ar marķieru izvietošanu uz ādas. [6, 7, 12, 13, 21, 54, 67, 77, 79, 82, 87, 100]

Reģistrēto datu apstrāde pārsvarā notiek ar specializēto datora programmatūru izmantošanu, nevis manuāli. Bieži izmanto ierīču (kameru, datoru, apstrādes bloku. un tml.) un datoru programmatūras kompleksus – kustību analīzes sistēmas (pazīstamākie šādu kompleksu ražotāji ir Qualisys (Zviedrija), Vicon (ASV), BTS (Itālija) u.c.). Tādas sistēmas parasti ļauj apvienot kustību analīzes metodes ar citām izplatītām sporta biomehānikas metodēm (elektromiogrāfiju, tenzodinamometriju u.c.), sinhronizējot signālu no dažādām ierīcēm. Iekārtu sinhronizācija ir nepieciešama, lai nodrošinātu vienlaicīgu datu nolasīšanu. Kustību analīzes sistēmās, kurās izmanto vairākas kameras, ir nepieciešams sinhronizēt visu kameru videoierakstus, lai varētu precīzi novērtēt 3D marķieru koordinātes. Precīza videokameru ekspozīcijas laika sinhronizācija var būt panākta ar ārēja trigeru signāla ģenerēšanu, kas palaiž visu iekārtu darbību vienlaicīgi.

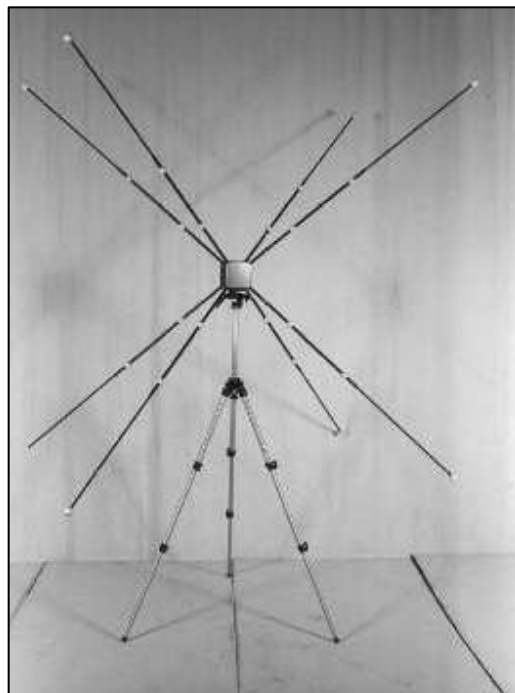
Dažreiz izmanto nevis specializēto kustību analīzes programmatūru un aprīkojumu, bet pielāgo kustību analīzei nespecifisko programmatūru, video- un fotokameras. Tādā gadījumā attēlu apstrāde notiek manuāli, ar datora palīdzību. Tas ļauj samazināt tiešos finansiālos ieguldījumus kustību analīzē, bet ierobežo analīzes ātrumu, iespēju daudzveidību, dažreiz arī rezultātu precizitāti. [67, 79]

1.3.1. Telpisku koordinātu rekonstrukcija

Procedūru, kas nepieciešama marķieru telpisku koordinātu rekonstrukcijai no videoierakstiem kustību analīzē parasti sauc par kameru kalibrēšanu. Ar to saprot koordinātu sistēmas ieviešanu filmējamā plaknē vai telpā un kameru parametru (attālums, pozīcija, tālummaiņa, savstarpējais izvietojums, objektīva izkropļojums) noteikšanu šajā koordinātu sistēmā. Kameru kalibrēšana ir nepieciešama, lai varētu videoieraksta kadra mērogā noteikt interesējošo punktu (sportista ķermeņa orientieru) koordinātes un veikt kustību analīzes galveno uzdevumu – ķermeņa segmentu kinemātisko rādītāju novērtēšanu. [57, 58, 79]

Pastāv dažādi kameru kalibrēšanas algoritmi, bet viens no izplatītākajiem ir tiešās lineārās pārveidošanas metode („Direct Linear Transformation”, DLT, angļiski), kuru 1971. gadā piedāvāja Abdel-Aziz un Karara un kura vēlāk bija papildināta un uzlabota. Šī metodes pamatā ir tiešā sakarība starp objekta telpiskām un attēla plakaniskām koordinātēm, ko 3D gadījumam nosaka 11 savstarpēji saistīti koeficienti, bet 2D gadījumam – 8 koeficienti. Koeficientu aprēķins parādīts 2. pielikumā. [1, 43, 57, 58, 143]

Praksē kameru kalibrēšanai izmanto dažāda tipa testa objektus ar marķētiem punktiem, kuru telpiskās koordinātes kādā nekustīgā koordinātu sistēmā ir zināmas. 1.9. attēlā parādīts testa objekta piemērs.



1.9. att. Testa objekts kameru kalibrēšanai kustību analīzē [6]

Testa objektu sinhroni reģistrē ar visām kamerām, kas tiks izmantotas kustības ierakstam. Tā, lai punkti ar zināmām koordinātēm aizpildītu pēc iespējas vairāk telpas, kurā notiks kustība. Ja kustības laikā marķieri uz sportista ķermeņa iziet ārpus kalibrētās telpas, to koordinātu aprēķins ir neprecīzs, tādēļ jānodrošina, ka visa nepieciešamā telpa tiek ietverta kalibrēšanas procedūrā.

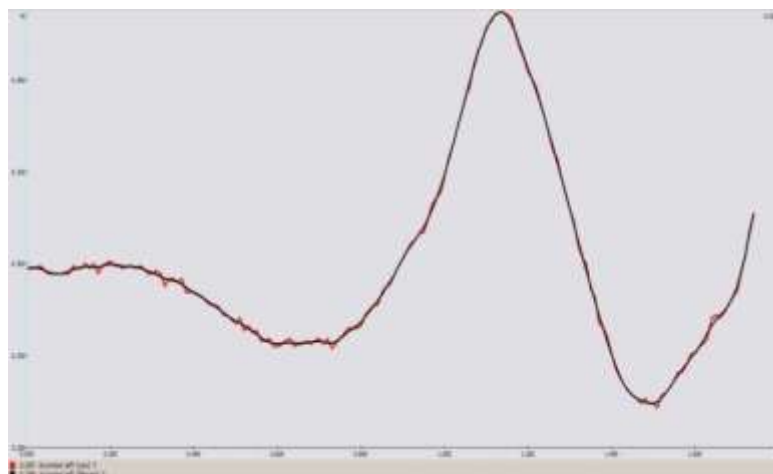
Pēc testa objekta videoreģistrācijas testa objekta punktus kartē katrā videoierakstā un katram punktam katra videoieraksta plaknē iegūst 2D koordinātu vērtības. Šīs 2D koordinātes izmanto, lai aprēķinātu DLT koeficientus. Mūsdienu kustību analīzes sistēmu datora programmatūras parasti jau iekļauj sevī kameru kalibrēšanas moduļus, kas aprēķina nepieciešamos parametrus automātiski. Minimālais nepieciešamais reģistrēto testa punktu skaits ir 6, bet praksē pielieto ne mazāk kā 15 – 20 punktus, lai paaugstinātu koeficientu aprēķina precizitāti.

Gadījumā, ja ieraksta laikā videokameras paredzēts panoramēt, visu kameru redzes laukā nepieciešams izvietot papildus references objektus ar zināmām koordinātēm, lai katrā ieraksta brīdī katras kameras redzes laukā būtu vismaz divi šādi objekti. Tas ļauj ieviest nepieciešamās aprēķinu korekcijas, kas ņem vērā mainīgu videokameru pozicionēšanu. [6, 37, 67, 79]

1.3.2. Signāla filtrācija

Pieņemts, ka sporta kustību analīzē derīgs signāls aizņem spektra zemās frekvences, taču videoierakstā kartēto punktu koordinātēm (gan manuālā, gan automatiskajā režīmā) ir raksturīgi traucējumi plašākā frekvenču spektrā. Vienkāršībai šos traucējumus parasti uzskata par balto troksni. Signāla un trokšņa attiecības uzlabošanai kustību analīzē izmanto trīs filtrēšanas, vai nogludināšanas, metodes: digitālos zemo frekvenču filtrus (visbiežāk Battervorta filtru), frekvenču vērtību apgabala metodes (parasti Furjē rindu nošķelšanu) un splineu izlīdzināšanu (parasti vispārināto savstarpēji pārbaudīto piektās pakāpes splineu). Digitālie filtri un frekvenču apgabala metodes ir vairāk piemēroti ciklisko kustību datu apstrādē (riteņbraukšana, sprints u.c.). Splineu izlīdzināšanas metode parasti ļauj iegūt precīzākus signāla atvasinājumus, kas ir svarīgi, ja bez punktu koordinātēm jānosaka arī to kustības ātrums un paātrinājums. Nenofiltrēto koordinātu vērtību atvasināšana noved pie lielām kļūdām atvasināto mainīgo novērtēšanā, pieaugot atvasinājuma pakāpei pieaug arī kļūda. Tādēļ iegūtos datus vispirms nogludina un tikai pēc tam aprēķina ātrumus un paātrinājumus. 1.10. attēlā parādīta sākotnējā, neapstrādātā, un nofiltrētā kamaniņu braucēja pleca locītavas y koordināte starta pirmo fāžu izpildes laikā.

Robežfrekvences digitālajiem filtriem rekomendēts noteikt ar atlikumu pārbaudes metodi. Robežfrekvences jāizvēlas tā, lai visaugstākā interesējošās kustības frekvence netiktu nofiltrēta. Katram punktam vēlams piemeklēt savu atbilstošo nogludināšanas robežfrekvenci. Pārsvārā gaitas analīzei izmanto 6 Hz robežfrekvenci, bet skriešanai – no 8 līdz 12 Hz. [6, 13, 21, 38, 60, 65, 67, 74, 105, 106, 107]

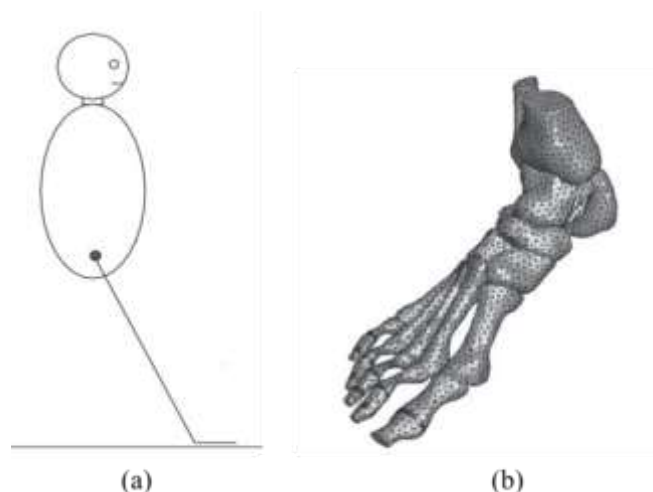


1.10. att. Sākotnējās un nogludinātās pleca koordinātes funkcija no laika

Ar sarkanu parādīts sākotnējais grafiks, redzami signāla traucējumi; ar melnu parādīts tās pašas koordinātes grafiks pēc nogludināšanas ar piektās pakāpes splainu. Pa X asi – laiks, pa Y asi – koordinātes vērtība metros

1.4. Kustību modelēšana sporta biomehānikā

Teorētiskā pieejā sporta biomehānikas jautājumu atrisināšanā bieži izmanto dažāda veida modeļus, kuri vienkāršoti atspoguļo pētāmās fiziskās sistēmas. Šādu modeļu priekšrocība ir iespēja veikt „idealizētu eksperimentu”, kurā var modificēt tikai vienu interesējošo parametru, bet visus pārējos atstājot nemainīgus. Kā jau minēts, cilvēka ķermenim ir ļoti sarežģīta struktūra, tāpēc jebkāds modelis ir vienkāršojums salīdzinājumā ar reālo cilvēka ķermeni. Vienkāršojuma pakāpe ir atkarīga no tā, kāda kustība vai kādi parametri ir jāizpēta – katram konkrētam uzdevumam ir jākonstruē savs modelis. Vispārējais noteikums modeļu izbūvē ir sekojošs – modelim jābūt pēc iespējas vienkāršākam, bet pietiekoši sarežģītam, lai atrisinātu nostādīto uzdevumu. Dažādām locītavām un ķermeņa segmentiem izveidoti dažādas sarežģītības modeļi: no modeļiem ar vienu brīvības pakāpi (piemēram, cilvēka masu centra trajektorijas modelēšanai normālajā gaitā) līdz sarežģītiem galīgo elementu modeļiem (piemēram, slodzes sadalījuma novērtēšanai starp pēdu un dažādām virsmām), kā ilustrēts 1.11. attēlā.



1.11. att. Dažādas sarežģītības modeļi sporta biomehānikas uzdevumu risināšanai

(a) divu segmentu cilvēka ķermeņa modelis normālas gaitas modelēšanai [3]; (b) telpisks galīgo elementu pēdas kaulu un mīksto audu modelis [25].

Modeļus visbiežāk izmanto, lai risinātu tiešo un apgrieztu dinamikas uzdevumus. Tiešajā dinamikas uzdevumā ir zināmi pieliktie spēki, un jāatrod kustība, kas rodas pielikto spēku rezultātā. Tiešā dinamikas uzdevuma risināšanā modeļa kustināšanai par „dzinējiem” izmanto ar dažādām metodēm noteiktos muskuļu spēkus un spēka momentus. Apgrieztajā dinamikas uzdevumā, savukārt, ir zināma kustība (trajektorijas, ātrumi un paātrinājumi), un ir nepieciešams noteikt to izsaukušos spēkus. Šī uzdevuma risināšanai kā sākotnējo informāciju bieži izmanto kustību analīzes rezultātā iegūtos datus. Apgrieztās dinamikas metodes ļauj novērtēt summāros muskuļu spēkus un momentus, kuri darbojas ap locītavu, bet neļauj noteikt katra atsevišķa muskuļa spēka momentus vai kaulu kontakta spēku. Tomēr apgrieztās dinamikas metodes dod iespēju iegūt papildus informāciju par kustības kinētiku, kas kopā ar kinemātiskajiem rādītājiem sniedz vērtīgu ieskatu kustības būtībā.

Sporta biomehānikas uzdevumu risināšanai pārsvarā izmanto modeļus, kuros segmentus modelē ar savā starpā savienotiem absolūti cietiem ķermeņiem. Katram modeļa segmentam ir nepieciešams uzdot tā masu, garumu, masu centra izvietojumu, inerces momentus un lokālās koordinātu sistēmas asis. Cilvēka ķermeņa segmentu masas un inerces rādītājus nosaka ar dažādām metodēm, bet visbiežāk izmanto literatūrā pieejamās koeficientu tabulas, dažas no kurām izskatīts zemāk, 1.4.1. apakšnodaļā. Plakaniskam modelim nepieciešama viena inerces momenta vērtība, bet telpiskam modelim nepieciešami jau trīs inerces momenti.

Segmentu garumus var noteikt pēc eksistējošām tabulām, vai veicot individuālus segmentu mērījumus. Šāds variants ļauj veidot katram sportistam precīzākus individuālus modeļus.

Cilvēka ķermenim piemīt mainīga konfigurācija, kas apgrūtina ķermeņa segmentu orientācijas noteikšanu. Tā kā lielākā daļa no sporta kustībām ir saliktās kustības, tad segmentu kustību un telpiskas orientācijas aprakstam parasti izmanto vai Eilera leņķus. Pāreju no segmenta lokālās koordinātu sistēmas uz references „pasaules” koordinātu sistēmu izsaka formula:

$$y_i = [R] * x_i + v,$$

kur y_i – punkta i izvietojums segmentā, izteikts pasaules koordinātēs;

$[R]$ – pārejas matrica;

x_i – punkta i izvietojums segmentā, izteikts segmenta lokālajās koordinātēs;

v – segmenta koordinātu sistēmas sākuma punkts, izteikts pasaules koordinātes.

Imitācijas modeļos segmentus savieno ar locītavu elementiem, pieņemot, ka locītavās nepastāv berze un segmenti savienojas pa līniju vai punktā. Tas ir vēl viens vispārpieņemtais vienkāršojums, kas pietiekoši labi apraksta cilvēka locītavu lielāko daļu, bet, piemēram, pleca locītavai, kurā savienojas četri kauli, ir rūpīgi jānovērtē šāda vienkāršojuma atbilstība pētāmā jautājuma risināšanai.

Lai modelētu ķermeņa kontaktu ar ārējām virsmām, bieži izmanto papildus savienošanas elementus, kas ļauj ķermenim, piemēram, rotēt ap uzdoto punktu. Šādas pieejas galvenais trūkums ir tas, ka nav iespējams modelēt sadursmi ar virsmu. Alternatīvs variants ir izmantot viskoelastiskos elementus modeļa kontakta vietās ar ārējo virsmu. Vienādojumu sarežģītība tādiem elementiem variē atkarībā no pētījuma uzdevuma.

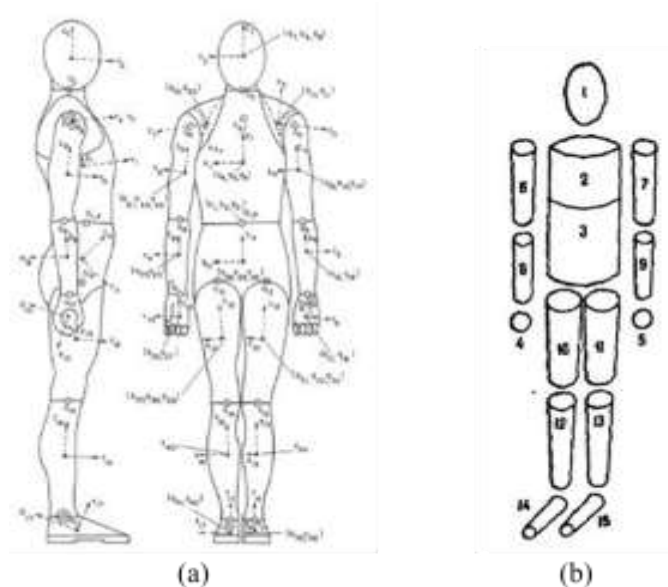
Dažreiz imitācijas modeļos izmanto arī muskuļu modelēšanu – pārsvarā izmanto A.V. Hilla muskuļa modeli. Atsevišķu muskuļu modeļu trūkums ir grūti nosakāmi muskuļa elementu individuālie parametri – visus nepieciešamos rādītājus nav iespējams noteikt neinvazīvi.

Kustības imitēšanas veikšanai ar izveidoto ķermeņa modeli modelim jāuzdod katra segmenta sākotnējā pozīcija un vai nu spēki, kas izraisa kustību, vai segmentu veidoto leņķu laika funkcijas. Imitēšanas rezultātā var iegūt ķermeņa pozīcijas interesējošos momentos, segmentu ātrumus, spēka momentus un reakcijas spēkus locītavās. Viens no uzdevumiem, kuru sporta biomehānikā risina ar imitācijas modeļu palīdzību, ir kustību optimizācija un vizualizēšana.

Kustības optimizācijas realizācijai ar imitācijas modeli ir jāizpilda trīs soļi: jānosaka optimizējamais parametrs (piemēram, tāllēkšanas gadījumā tas ir lēciena garums, bet citos gadījumos optimizējamais parametrs var būt arī sarežģītāka funkcija), katram mainīgam jānosaka reālistiskas robežas un jāizvēlas algoritms, kas spēs piemeklēt globālo, nevis lokālo optimumu. Citi uzdevumi, kurus risina ar modelēšanas palīdzību, ir kustību mehānikas analīze un dažādu elementu ietekmes pārbaude uz kopējo rezultātu. Pirms modeļa pielietošanas pētījuma jautājumu atrisināšanai ir nepieciešams novērtēt, vai modelis adekvāti atspoguļo reālos procesus fiziskajā sistēmā. To dara salīdzinot rezultātus, kas aprēķināti ar modeļa palīdzību, ar reālajām parametra vērtībām. Tas prasa sākotnējo kustības datu iegūšanu no sportista (piemēram, kustību analīzes dati). Sporta biomehānikā parasti pieņemts, ka modelis atzīstams par pietiekoši precīzi atbilstošu reālai fiziskai sistēmai, ja ar modeli aprēķinātie dati atšķiras no reālajiem datiem 10% robežās. [3, 25, 36, 52, 75, 76, 78, 79, 86, 93, 102, 110, 111, 112, 115, 125, 128]

1.4.1. Ķermeņa masu ģeometrija

Ar masu ģeometriju sporta biomehānikā saprot rādītāju kopu, kas raksturo masu sadalījumu cilvēka ķermenī (visa ķermeņa un ķermeņa segmentu masas un inerces momenti, masu centru koordinātes, segmentu inerces rādiusi u.c.). Segmentu masu ģeometrijas rādītāji ir nepieciešami precīziem aprēķiniem biomehāniskajos modeļos. Indivīdu masas un inerces rādītāju novērtēšanai izmanto trīs pamata metodes – regresijas vienādojumus (izstrādāti balstoties uz līķu izmeklējumiem vai dzīvu cilvēku medicīniskās attēlošanas datiem); ģeometriskos ķermeņa modeļus un medicīniskās attēlošanas metodes. Ir svarīgi izmantot tādus segmentu datus, kas ir tuvi reālajiem pētāmo sportistu antropometriskajiem rādītājiem. Pielietojot regresijas vienādojumu metodi tas ir iespējams tikai tad, ja izpētīto subjektu antropometrija ir tuva modelējamā indivīda rādītājiem. Savas ierobežotas pieejamības dēļ medicīniskā attēlošana nav plaši izplatīta masu ģeometrijas noteikšanas metode – reti, kad pētījuma dalībniekiem ir iespējams veikt, piemēram, magnētiskās rezonanses tomogrāfijas procedūru. Tāpēc sporta biomehānikā masas un inerces parametru novērtēšanai parasti izmanto ģeometriskos cilvēka ķermeņa modeļus, neskatoties uz to, ka precizitātes ziņā medicīniskās attēlošanas metodēm ir priekšroka. Mūsdienu sporta zinātnē izmanto vairākus ģeometriskos cilvēka ķermeņa modeļus, kuru izstrādei veltīti Clauser, Hanavan, Hatze, de Leva, Селуянов, Зациорский un citu autoru darbi. Izplatītākie no šiem modeļiem jau ir iekļauti dažādās kustību analīzes programmatūrās



1.12. att. Cilvēka ķermeņa ģeometriskos modeļu piemēri masas un inerci rādītāju aprēķinam

(a) 17 segmentu cilvēka ķermeņa modelis pēc Hatze (1980), modeļa individualizācijai nepieciešami 242 antropometriskie mērījumi katram indivīdam [41]; (b) 15 segmentu cilvēka ķermeņa modelis pēc Hanavan (1964), individuālā modeļa izveidei nepieciešami tikai 26 antropometriskie mērījumi [40].

Modeļu iekļaušana kustību analīzes datora programmatūras paketēs ļauj papildus aprēķināt kopējā ķermeņa masu centra kinemātiskos rādītājus. 1.12. attēls demonstrē divus dažādas sarežģītības ģeometriskos cilvēka ķermeņa modeļus kā masu ģeometrijas noteikšanas metodes ilustrāciju. Viens no izplatītākajiem šodien pielietojamiem ģeometriskajiem modeļiem ir de Leva uzlabots Zatsiorsky-Seluyanov modelis. 3. pielikumā ievietotas segmentu masu un inerci parametru vērtību tabulas no šī modeļa un no oriģinālā Zatsiorsky un kol. darba.

Masas un inerci rādītāju novērtēšanas kļūdas izmantojot ģeometriskos ķermeņa modeļus un regresijas vienādojumus variē no modeļa uz modeli, bet pārbaudes rāda, ka slēgtām kinemātiskām ķēdēm segmentu rādītāju novērtēšanas neprecizitātes nav būtiskas (piemēram, gaitas modelēšanai ir pieļaujama segmentu rādītāju novērtēšanas kļūda līdz 50%). Daudz vairāk masu ģeometrijas neprecizitātes ietekmē kustības, kas veido vaļējās kinemātiskās ķēdes – jau 5% procentu kļūda segmentu inerci parametros var novest līdz 50% kļūdai spēka momentu aprēķinā. Lai novērtētu izvēlētajās masu ģeometrijas noteikšanas metodes ietekmi uz pētījuma rezultātiem, ir rekomendēts vienam un tam pašam pētījumam izvēlēties vairākas segmentu parametru aprēķinu metodikas un iegūtos rezultātus salīdzināt savā starpā. [13, 21, 26, 31, 32, 40, 41, 42, 44, 64, 73, 117, 118, 119, 120, 125]

2. PĒTĪJUMA METODIKA

Promocijas darba pētījuma veikšanā izmantotas sekojošas metodes: datorizētā kustību analīze, datora modelēšana, optoelektroniskā laika reģistrācija, kā arī matemātiskās statistikas metodes.

2.1. Datu reģistrācija

2.1.1. Pētījuma organizācija un pētījuma posmu raksturojums

Šī darba realizācijai nepieciešamo datu reģistrācija veikta Siguldas kamaniņu trasē un starta estakādē (2.1. attēls). Lai novērtētu sportistu progresu starta izpildē, dati tika reģistrēti trīs secīgās sporta sezonās – no 2009./2010. gada sezonas līdz 2011./2012. gada sezonai. Pētījuma datu vākšana organizēta četros posmos, kas raksturoti 2.1. tabulā. Materiāls iegūts pirmssacensību un agrā sacensību periodā. Datu reģistrācija norisinājās mācību-treņu nometņu laikā, kuru galvenais virziens bija starta tehnikas uzlabošana un sagatavošanās sezonas pirmajām sacensībām.



(a)



(b)



(c)

2.1. att. Siguldas kamaniņu sporta estakāde un trase

(a) starta estakāde; (b) vīriešu starta vieta trasē; (c) sieviešu starta vieta trasē.

Pētījuma posmu raksturojums

Pētījuma posms	I	II	III	IV
Laika periods	2009. g. sept. – okt.	2009. g. sept.	2010. g. sept. – nov.	2011. g. okt.
Dienu skaits	6	1	18	1
Vieta	estakāde, trase	estakāde	estakāde, trase	estakāde
Dalībnieku skaits	8	x	5	6
Mēģinājumu skaits	538	x	457	53

I, III un IV posmos reģistrēts starta izpildes laiks un videoieraksti, kas nepieciešami kustību analīzei. I un III posma dati reģistrēti gan starta estakādē, gan trasē, IV posmā – tikai estakādē. II posmā veikti kameru kalibrēšanas videoieraksti un starta estakādes mērījumi, kas nepieciešami jaunas kalibrēšanas metodikas izstrādei.

Starta estakādē sportisti veica startus divās grupās (sievietes un vīrieši), abās grupās treniņa shēmas realizācija bija vienāda: pēc iesildīšanās sportisti izpildīja 4 līdz 5 startus ar 2 – 3 minūšu atpūtas intervālu starp tiem, tad sekoja 15 minūšu aktīvās atpūtas intervāls, pēc kura sportisti izpildīja vēl 4 līdz 6 startus ar 2 – 3 minūšu atpūtu starp tiem. Sportistus motivēja izpildīt katru startu ar iespējami labāko laiku un tehnisko izpildījumu. Nepieciešamais nosacījums bija izpildīt startus ar pilnām piecām starta fāzēm (iedalījums fāzēs aprakstīts 1.1.3. apakšnodaļā).

Dati kamaniņu trasē reģistrēti divu treniņu dienu laikā I pētījuma posmā un piecu dienu laikā III pētījuma posmā. Trasē nobraucieni veikti vienā grupā – vīrieši startēja no augšējās starta vietas, sievietes no apakšējās (par starta vietām trasē skat. 1.1.1. apakšnodaļu un 2.1. attēlu). Katrs sportists izpildīja 4 braucienus ar aptuveni 10 minūšu intervālu starp tiem. Laika mērījumi ņemti no oficiālā treniņu protokola, kurā parādīts starta posma pārvarēšanas laiks un laiks finišā.

2.1.2. Pētījuma dalībnieki

Pētījuma dalībnieki ir kamaniņu braucēji ar pieredzi sportā ilgāku par 5 gadiem un starptautisko sacensību pieredzi ilgāku par 3 gadiem: 4 vīrieši un 4 sievietes, kas uzstājas junioru un pieaugušo kategorijā starptautiskā mēroga sacensībās individuālajās disciplīnās. Dalībnieku dati apkopoti 2.2. tabulā.

Pētījuma dalībnieku dati

Sport.	Dz.	Dz. gads	Sacensību kategorija	Augums*, cm	Svars*, kg	Svars ar kamanā m*,kg	Personīgais starta rekords estakādē* **, s
A1	Siev.	1972.	Pieaugušie	174	86,6	109,6	0,69/2,35
A2	Siev.	1983.	Pieaugušie	173	73,1	96,1	0,69/2,36
B1	Siev.	1990.	Juniori	175	73,7	96,7	0,68/2,35
B2	Siev.	1990.	Juniori	170	69,1	92,1	0,67/2,37
C	Vīr.	1991.	Juniori	191	86,8	109,8	0,58/2,15
D1	Vīr.	1978.	Pieaugušie	184	81,9	104,9	0,63/2,24
D2	Vīr.	1974.	Pieaugušie	176	89,3	112,3	0,64/2,24
D3	Vīr.	1986.	Pieaugušie	183	88,7	111,7	0,59/2,16

*2009. gada septembra dati;

** norādīts laiks 5,6 m un 17,6 m attālumā no starta rokturiem.

2.1.3. Izmantotā aparatūra

Datu reģistrācijā izmantota sekojoša aparatūra:

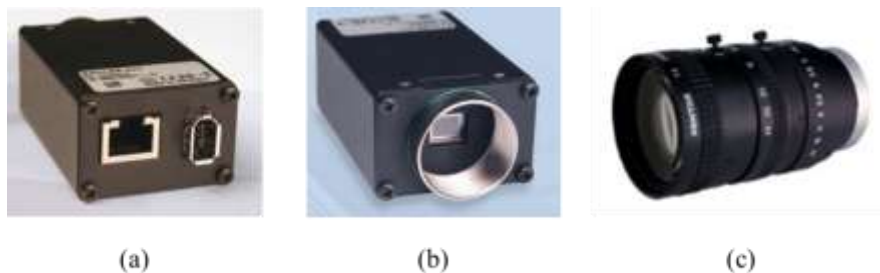
- portatīvā optoelektroniskā kustību analīzes sistēma Simi Motion (Simi Reality Motion Systems GmbH, Minhene, Vācija);
- digitālā videokamera Sony DCR-HC96E ar platleņķa objektīvu Sony VCL-HA07A (Sony Corporation, Tokija, Japāna);
- digitālais fotoaparāts Casio EX-FH20 (Casio Computer Co., Ltd., Tokija, Japāna);
- digitālās videokameras Samsung VP-D102D (Samsung Electronics, Seula, Dienvidkoreja), Sony HDR_XR350VE (Sony Corporation, Tokija, Japāna) un Panasonic HDC-TM700K (Panasonic Corporation, Osaka, Japāna);
- lāzera kameru kalibrēšanas sistēma Simi Motion;
- hronometru komplekts Brower (Brower Timing Systems, Dreipera, UT, ASV).

Portatīvā optoelektroniskā kustību analīzes sistēma Simi Motion

Simi Motion portatīvās kustību analīzes sistēmas komponentes:

- portatīvais dators ar Windows XP operētājsistēmu, diviem fiziskiem cietajiem diskiem un IEEE 1394 un ExpressCard interfeisa atbalstu;
- datora programmatūra Simi Motion, versija 7.5.288;
- divas ātrgaitas videokameras Basler A602fc (Basler AG, Ārensburga, Vācija) ar Pentax H6Z810 (Pentax Corporation, Tokija, Japāna) objektīvu;
- barošanas strāvas adapteri Basler A602fc videokamerām Ansmann APS 1612 (Ansmann AG, Assamštadta, Vācija);
- ievadizvades USB kopnes modulis DT9817 (Data Translation, Inc., Marlboro, Mass., ASV), adaptēts SIMI Motion sistēmai;
- trīs IEEE 1394 interfeisa atkārtotāji IOI-1394R3B (IOI Technology Corporation, Ņutaipeja, Taivāna);
- četri 10 m gari 6 – 6 kontaktu IEEE 1394a vadi;
- divi 20 m gari koaksiālie pieslēgšanas vadi;
- IEEE 1394a – 1394b pārejas vads;
- ExpressCard interfeisa paplašināšanas karte, aprīkota ar IEEE 1394a-tipa ligzdām Delock 61387;
- divi Manfrotto 190XProbe statīvi ar Manfrotto 804RC2 statīva galvām (Lino Manfrotto + co. Spa, Kassola, Itālija);
- Simi Motion lāzera kalibrēšanas sistēma.

Basler A602fc videokameras var lietot arī neatkarīgi no Simi Motion sistēmas. Tās ir mašīnredzes industrijā izmantojamās laukuma skenēšanas VGA videostandarta ciparkameras ar KMOP (CMOS) 656 x 490 pikseļu lielu sensoru, kas reģistrē signālu gaismas redzamajā diapazonā (2.2. attēls (a) un (b)). Pie pilnas izšķirtspējas un bitu skaita 8 biti uz pikseli kamera var reģistrēt video ar frekvenci līdz 100 kadriem sekundē daudzkrāsu formātā. [8, 9, 134]



2.2. att. Basler A602fc videokamera ar Pentax H6Z810 objektīvu [9, 45]

(a) Basler A602fc kameras savienotāji: 10-kontaktu (10-pin) RJ45 un IEEE 1394a; (b) Basler A600f-sērijas kameras adapteris objektīvam ar C- tipa (C-Mount) vītņoto savienojumu; (c) Pentax H6Z810 CCTV objektīvs ar C-tipa vītņoto savienojumu.

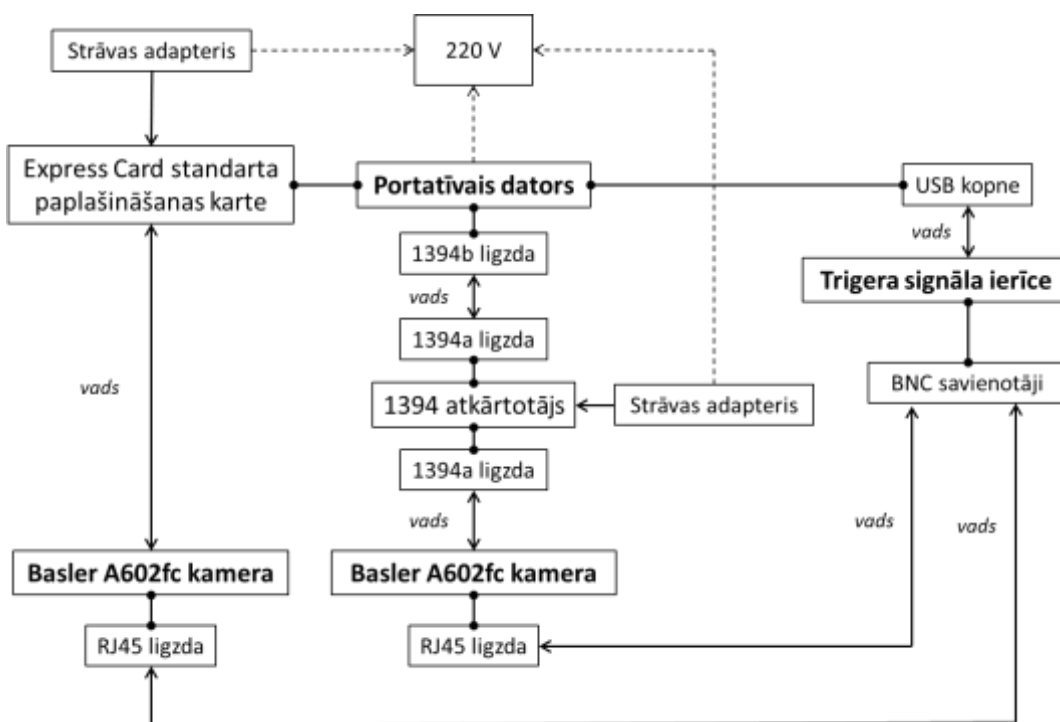
Pentax H6Z810 objektīvu pievieno A602fc kamerai ar C-tipa vītņoto savienojumu (2.2. attēls (b) un (c)); objektīvam ir manuālā tālummaiņa, kā arī fokusa un diafragmas atvēruma maiņa. Maksimālais horizontālais redzes leņķis pie 1/2" formāta ir aptuveni 43°, vertikālais – 34°. [45]

Videosignāla pārraidei A602fc kamerās izmanto IEEE 1394 interfeisu. Kameras aprīkotas ar IEEE 1394a-tipa (6-kontaktu) ligzdu. Kamerās nav paredzēta iekšējā atmiņa, tāpēc signāla reģistrācijas laikā informācija jāieraksta ārējā (datora) cietajā diskā. Kamerās nav paredzēts arī iekšējais barošanas avots, un tas padara kustību analīzes sistēmu atkarīgu no ārējā strāvas avota. Lai ierakstītu kadru virkni („video”) ar IEEE 1394 interfeisa kamerām, nepieciešama speciālā programmatūra, kas nodrošina kadru tveršanas funkciju un atbalsta attiecīgā ražotāja videokameras. Simi Motion datora programmatūrā ir iebūvēts kadru tveršanas modulis, kas atbalsta tai skaitā arī ar Basler A602fc kameras. Simi Motion 7.5.288. versijas datora programmatūra ir paredzēta darbam Windows XP (Microsoft Corporation, Redmonda, WA, ASV) operētājsistēmā. Šī programmatūra neļauj veikt kadru tveršanu no A602fc kamerām pie maksimālās frekvences (100 kadri sekundē), ja vairākas kameras ir pieslēgtas caur ExpressCard interfeisa paplašināšanas karti, tāpēc pie portatīvā datora ar vienu IEEE 1394 savienotāju un vienu izvērse slotu var pieslēgt tikai divas ātrgaitas videokameras. Lai realizētu video ierakstīšanu no divām A602fc kamerām ar Simi Motion datora programmatūras palīdzību, 2008. gada paaudzes portatīvajā datorā bija nepieciešami divi fiziski Serial ATA interfeisa cietie diski.

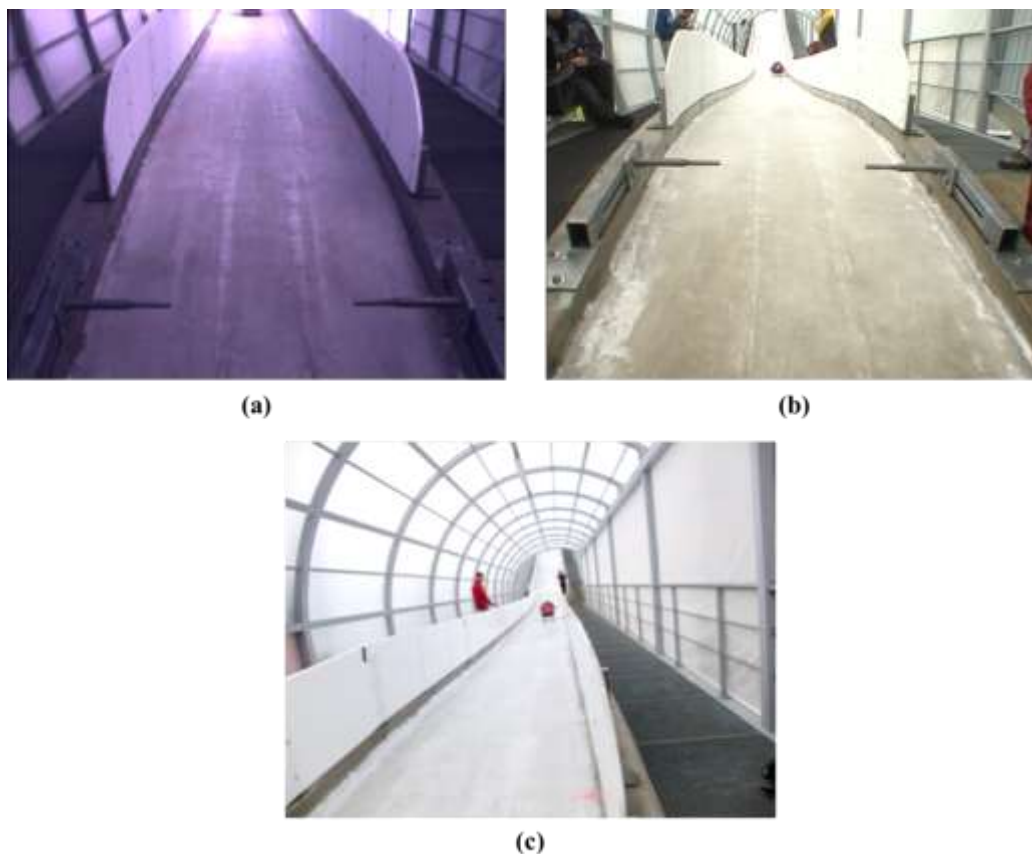
Precīzam punktu telpisku koordinātu aprēķinam vairāku kameru videoierakstiem jābūt sinhronizētiem savā starpā. Kameru sinhronizāciju Simi Motion sistēmā nodrošina ar ārējo trigeru signālu, kas abās kamerās vienlaicīgi palaiž katra kadra reģistrāciju. Trigeru signāls tiek ģenerēts caur ievadizvades USB kopnes moduli DT9817, adaptētu Simi Motion sistēmai.

Kameras pieslēdz šim modulim ar koaksiālajiem vadiem, izmantojot kameru RJ45 ligzdu un DT9817 modulim pievienotos BNC savienotājus. Simi Motion sistēmas savienošanas shēma parādīta 2.3. attēlā.

A602fc kameras uzstāda filmēšanas vietā izmantojot Manfrotto 190XProbe statīvus (regulējams augstums no 8,5 līdz 146 cm) ar Manfrotto 804RC2 statīva galvām, kuras nodrošina iespēju regulēt kameras pagriezienu visās trīs plaknēs ar precizitāti līdz 5°. Kameras iestatījumu regulēšana (pastiprinājums, spilgtums, krāsu modelis u.c.), kā arī ieraksta palaišana un pārtraukšana notiek caur Simi Motion programmatūras moduļiem. Šajā darbā izmantots video krāsu modelis YUV. Objektīva tālummaiņa jāregulē manuāli. Pieejamā objektīva redzes leņķis ir salīdzinoši neliels, tāpēc visā datu reģistrācijas procesā tālummaiņa tika iestatīta uz minimālo vērtību. Ar Basler kamerām iegūtā digitālā attēla piemērs parādīts 2.4. attēlā (a).



2.3. att. Simi Motion kustību analīzes sistēmas savienošanas shēma



2.4. att. Dažādu videokameru ierakstu kvalitātes salīdzinājums darba apstākļos

(a) Basler A602fc videokamera ar Pentax H6Z810 objektīvu, izšķirtspēja 656 x 490 pikseļi; (b) Sony DCR-HC96E videokamera ar Sony VCL-HA07A platleņķa objektīvu, izšķirtspēja 720 x 576 pikseļi; (c) Casio EX-FH20 fotoaparāts, izšķirtspēja 480 x 360 pikseļi.

Digitālā videokamera Sony DCR-HC96E ar platleņķa objektīvu Sony VCL-HA07A

Kā datu nesējs šajā kamerā izmantotas MiniDV formāta videokasetes. Lietotais videoieraksta formāts ir PAL, filmēšanas frekvence 25 Hz, attēla samērs 4:3, izšķirtspēja 720 x 576 pikseļi (2.4. attēls (b)). Platleņķa objektīvs paplašina kameras horizontālo redzes leņķi līdz aptuveni 81°, bet vertikālo līdz aptuveni 65°.

Digitālais fotoaparāts Casio EX-FH20

Casio EX-FH20 digitālais fotoaparāts lietots datu reģistrācijas procesā ātrgaitas videoieraksta režīmā ar frekvenci 210 kadri sekundē. Tas ļauj ierakstīt pilnas krāsas video ar augstu kadru frekvenci pie relatīvi liela objektīva redzes leņķa (aptuveni 69° horizontāli un 55° vertikāli) un izšķirtspējas 480 x 360 pikseļi.

Ātrgaitas videoieraksta režīmā nav iespējams regulēt tālummaiņu un fokusu, šīs vērtības paliek tādas, kādas iestatītas pirms filmēšanas uzsākšanas. Ņemot vērā šo ierobežojumu un kadra nelielu izšķirtspēju, ātrgaitas režīmā EX-FH20 fotoaparāts ir vairāk piemērots tuvumā esošo objektu filmēšanai, jo attālināti objekti attēlā zaudē asumu. Ar fotoaparātu iegūtā videoattēla piemērs parādīts 2.4. attēlā (c). Fotoaparāta videoieraksti pārsvarā lietoti laika parametru novērtēšanai.

Digitālās videokameras Samsung VP-D102D, Sony HDR_XR350VE un Panasonic HDC-TM700K

Šīs trīs videokameras lietotas tikai II pētījuma posmā, lai reģistrētu videoierakstus, kas vēlāk izmantoti estakādes datormodeļa izveidē. Samsung VP-D102D savos parametros ir līdzīga Sony DCR-HC96E videokamerai un kā datu nesēju arī izmanto MiniDV formāta videokasetes. Filmēšanas standarts ir PAL ar filmēšanas frekvenci 25 Hz, izmantotais attēla samērs 16:9.

Sony HDR_XR350VE un Panasonic HDC-TM700K ir jaunās paaudzes digitālās videokameras, kas darbojas HD formātā (izmantotā kadra izšķirtspēja 1440 x 1080 pikseļi), bet datus saglabā iekšējā cietajā diskā. Datu pārvešana no šādām kamerām ir vienkāršāka un ātrāka, nekā no MiniDV kamerām, jo to var realizēt caur USB kopni. HD formāta kameras netika izmantotas kustību video reģistrēšanā, jo Simi Motion programmatūra neuztur HD formātu.

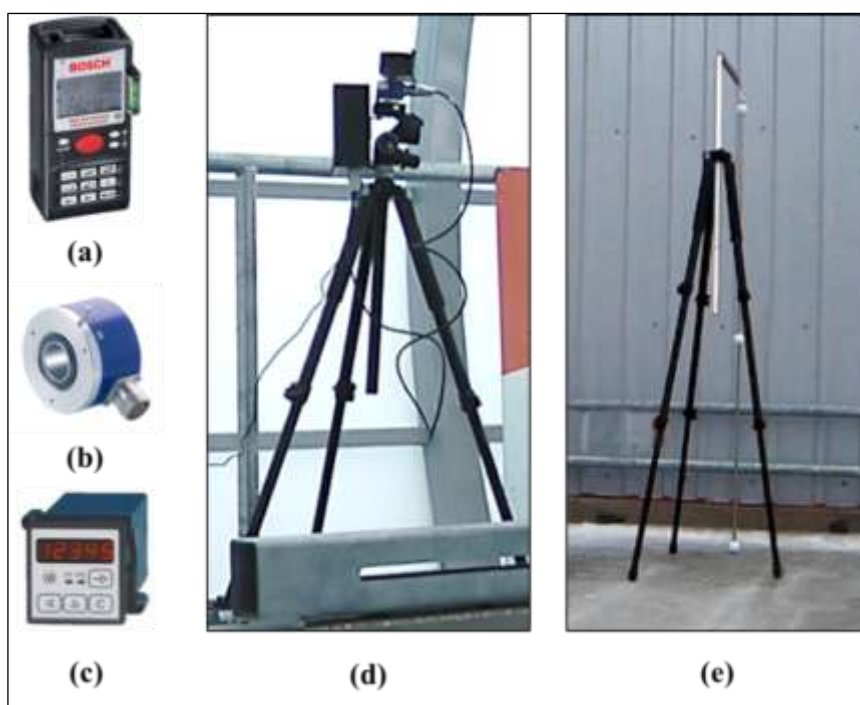
Lāzera kameru kalibrēšanas sistēma Simi Motion

Simi Motion lāzera kalibrēšanas sistēma sastāv no sekojošiem elementiem:

- lāzera tālmērs Bosch DLE 150 Connect (Robert Bosch, GmbH, Gerlingena, Vācija);
- leņķa sensors GI333 (Baumer IVO GmbH & Co. KG, Fillingena-Švenningena, Vācija);
- elektroniskais skaitītājs NE216 (Baumer IVO GmbH & Co. KG);
- statīvs Manfrotto 055XB ar Manfrotto 410 statīva galvu;
- testa objekts;
- datora programmatūras rīkkopa Simi Motion SmLaserCalib tool un programmatūras Simi Motion 3D kalibrēšanas modulis.

Lāzera tālmērs ir savienots ar leņķa sensoru un elektronisko skaitītāju, kas nodrošina gan attāluma noteikšanu līdz objektam, gan tālmēra pagriezienu leņķi (leņķa skaitliskā vērtība tiek izvadīta uz elektroniskā skaitītāja displeja). Barošanu tālmēram un pagriezienu noteikšanas blokam nodrošina akumulatori. Sistēmas montāža veikta Simi Reality Motion Systems GmbH ražotnē. 2.5. attēlā (a) – (d) parādītas lāzera kalibrēšanas sistēmas galvenās komponentes un sistēmas kopskats. Mērījumu vietā iekārtu uzstāda uz Manfrotto 055XB statīva (regulējams augstums no 7 līdz 178 cm) ar statīva galvas palīdzību. Statīva, statīva galvas un tālmēra līmeņrāži nodrošina horizontālu iekārtas izvietojumu.

Kā testa objektu kameru kalibrēšanai Simi sistēmā izmanto saskrūvējamus alumīnija stieņus ar spilgti baltiem sfēriskiem marķieriem. Attālums starp testa objekta marķieru centriem ir 750 mm, marķiera diametrs – 43 mm, stieņa diametrs – 11 mm, maksimālais testa objekta garums – 2250 mm (2.5. att. (e)). Testa objektu brīvi iekarina statīvā, kas nodrošina stienim vertikālu pozīciju. Kameru kalibrēšanas procedūra aprakstīta 2.2. nodaļā.



2.5. att. Simi Motion kalibrēšanas sistēma [10, 11, 135]

(a) lāzera tālmērs Bosch DLE 150 Connect; (b) leņķa sensors Baumer GI333; (c) elektroniskais skaitītājs Baumer NE216; (d) pozīcijas noteikšanas sistēmas kopskats; (e) kalibrēšanas testa objekts.

Hronometru komplekts Brower (Brower Timing Systems, Dreipera, UT, ASV)

Komplekta sastāvā ietilpst trīs fotoelementu pāri un signāla uztvērējs. Trīs fotoelementu pāri ļauj noteikt divas laika atzīmes. Rezultāts tiek atspoguļots signāla uztvērēja displejā. Hronometru komplekts izmantots starta laika noteikšanai Siguldas estakādē. Laiks mērīts ar precizitāti līdz sekundes vienai simtdaļai.

2.1.4. Aparatūras izvietošana

Fotoelementu izvietošana laika mērīšanai

Starta laika noteikšanai estakādē izmantoti fotoelementi. Trīs fotoelementu pāri ļāva noteikt divus laika intervālus. Pirmais („augšējais”) laiks raksturo sportista ātrumu estakādes slīpās daļas sākumā (šajā brīdī sportists ir izpildījis starta rāvienu un pirmo atgrūšanos no ledus), bet otrais („pilnais”) laiks parāda rezultātu estakādes slīpuma pakājē. 2.6. attēls principiāli paskaidro fotoelementu izvietojumu estakādē. Katrā pētījuma posmā pirmais fotoelementu pāris izvietots vienā un tajā pašā pozīcijā – tā, lai „augšējais” laiks tiek mērīts 3 m garajā intervālā. Otro fotoelementu pāri katrā nākamā sezonā pārvietoja tālāk no starta rokturiem (2.3. tabula). Hronometrs ļāva sportistiem iegūt starta mēģinājuma tūlītējo skaitlisko novērtējumu.



2.6. att. Fotoelementu pāru izvietošanas shēma

Ar sarkanām līnijām atzīmētas raidītāja un uztvērēja darbības zona
(a) skats no augšas; (b) skats no apakšas.

2.3. tabula

Fotoelementu izvietošana Siguldas starta estakādē

Pētījuma posmi	I	III	IV
1. fotoelementu pāra attālums no starta rokturiem, m	2,61	2,61	2,61
Attālums starp 1. un 2. fotoelementu pāri, m	3,00	3,00	3,00
2. fotoelementu pāra attālums no starta rokturiem, m	5,61	5,61	5,61
Attālums starp 2. un 3. fotoelementu pāri, m	12,00	15,00	22,30
Attālums starp 1. un 3. fotoelementu pāri, m	15,00	18,00	25,30
3. fotoelementu pāra attālums no starta rokturiem, m	17,61	20,61	27,91

Videokameru izvietošana

2.4. tabula

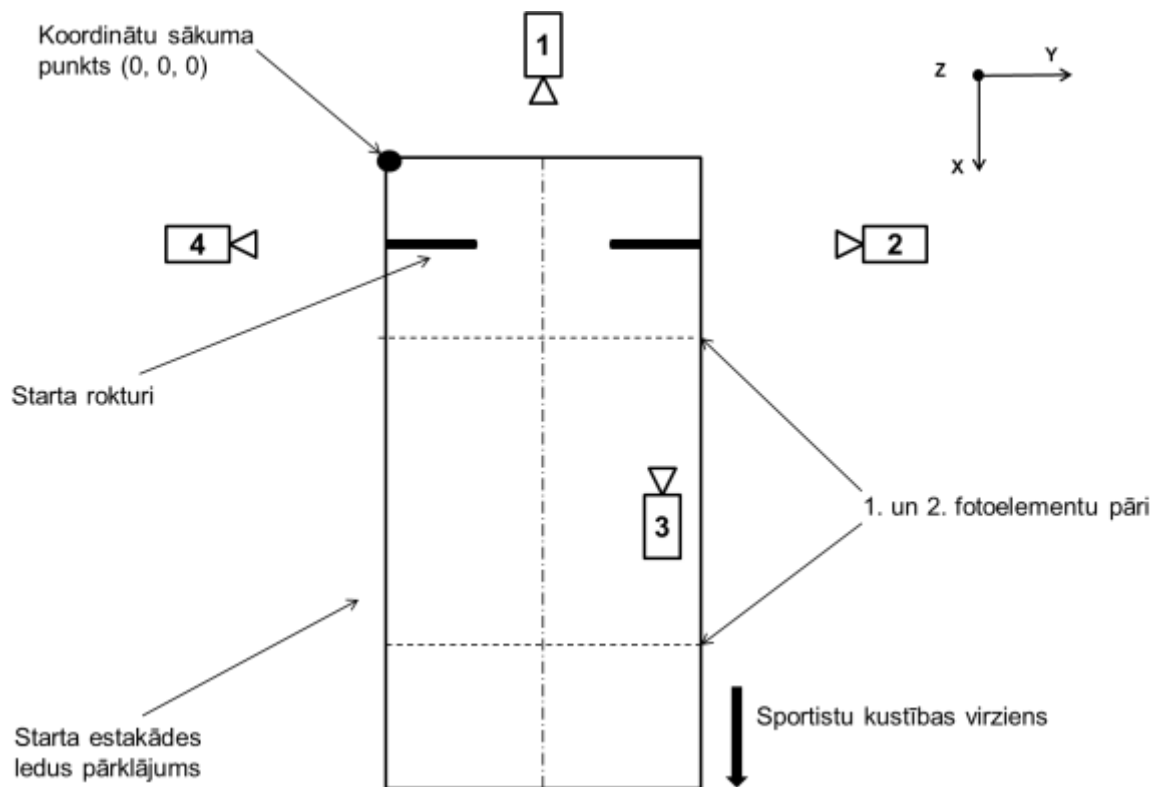
Videokameru izvietošana Siguldas starta estakādē

Kameras Nr.	Kameras tips	Kameras pozīcija			
		X, m	Y, m	Z, m	Leņķis, °
1	Sony	0,05	0,88	1,25	0
2	Basler	1,94	2,78	1,23	90
3	Basler	13,05	1,93	0,80	30
4	Casio	filmēts kustībā			

Kameru izvietojuma shēma Siguldas starta estakādē sportistu kustību reģistrācijas laikā parādīta 2.7. attēlā. Proporcijas kameru izvietojuma shēmā nav ievērotas. Par koordinātu sākuma punktu shēmā izvēlēts starta estakādes ledus pārklājuma labais augšējais stūris, Z ass ir vērsta vertikāli uz augšu, X ass – sportistu kustības virzienā. Visos pētījuma posmos izmantots pēc iespējas viens un tas pats kameru izvietojums (ar atšķirībām centimetru robežās) – 2.4. tabulā sniegtas kameru pozicionēšanas skaitliskās vērtības. Kameru koordinātes norādītas relatīvi pret izvēlēto koordinātu sākuma punktu; uzrādītais leņķis ir aptuvenais leņķis, ko veido kameras optiskā ass ar izvēlēto koordinātu sistēmas X asi. Tabulas skaitliskās vērtības ir aptuvenas, jo pie precīzas kameru kalibrēšanas (skat. 2.2. nodaļu) to izvietošanai nav principiālas nozīmes.

Datu reģistrācijas laikā kameras tika novietotas tā, lai nezaudējot attēla kvalitāti kameru redzes lauks pārklātu pēc iespējas vairāk nepieciešamās telpas.

II pētījuma posmā videokameru izvietojums bija līdzīgs 2.7. attēlā parādītajam, bet papildus bija izvietotas vēl trīs videokameras tālāk X ass virzienā. Papildus videokameras nodrošināja estakādes redzamību visā nepieciešamajā garumā vienlaicīgi vismaz divos videoierakstos.



2.7. att. Videokameru izvietošanas shēma starta estakādē

2.1.5. Datu reģistrācijas procedūra

Laika mērījumi starta treniņu laikā tika nolasīti no signāla uztvērēja displeja uzreiz pēc tam, kad sportists šķērsoja attiecīgā fotoelementu pāra darbības līniju. Abas divas laika vērtības tika atkārtoti nolasītas, kad sportists atgriezās starta vietā, lai sniegtu tūlītēju starta skaitlisko novērtējumu. Skaitliskās vērtības tika reģistrētas treniņa protokolā 35616894132.

A602fc kameru videoieraksta palaišana un pārtraukšana notika ar Simi Motion datora programmatūras rīkiem. Portatīvais dators tika izvietots blakus starta vietai estakādē, lai operators varētu vienlaicīgi sekot notiekošam gan datora ekrānā, gan starta platformā.

Programmatūra paredz, ka tekošais videoieraksts no katras kameras tiek saglabāts kā pagaidu datne, katrs atsevišķajā cietajā diskā. Jauns videoieraksts ierakstās tajā pašā datnē, aizvietojot iepriekšējo ierakstu. Tādēļ, ja tekošais videoieraksts ir nepieciešams turpmākam darbam, pirms nākošās video reģistrācijas uzsākšanas tas ir jā saglabā datora cietajā diskā kā jauna datne. Videoierakstu saglabāšanas process no divām kamerām aizņem aptuveni divreiz vairāk laika, nekā paša ieraksta ilgums; iegūstamās datnes apjoms ir salīdzinoši liels – vienu sekundi gara videoieraksta apjoms ir aptuveni 30 – 35 MB. Kamēr notiek tekošo videoierakstu saglabāšana, nav iespējams uzsākt jaunu video reģistrāciju. Tā kā laiks starp reģistrējamiem starta mēģinājumiem ir īss, operatoram ir jānodrošina pēc iespējas īsāku videoieraksta garumu, lai paspētu to saglabāt un uzsākt jaunu ierakstu pirms nākamā sportista starta. To ir iespējams panākt, ja video ierakstu ieslēdz īsi pirms kustības uzsākšanas un pārtrauc uzreiz pēc tam, kad sportists ir pazudis no kameras redzamības zonas. Tā kā sportisti startē bez jebkāda speciālā signāla, tad operatoram ir cieši jāseko kustībām, lai laicīgi ieslēgtu un izslēgtu videoieraksti un nodrošinātu visu starta mēģinājumu reģistrāciju.

Video reģistrācija ar Sony DCR-HC96E digitālo videokameru notika pārsvarā nepārtrauktā režīmā, lai izvairītos no kameras izkustēšanās no uzstādītās pozīcijas. Videoieraksta uzsākšana un pārtraukšana tika nodrošināta ar tālvadības pulti.

Video reģistrācija ar Casio EX-FH20 digitālo fotoaparātu notika manuālā režīmā. Tā kā fotoaparāts ir vairāk piemērots tuvumā esošo objektu filmēšanai, tas pārsvarā izmantots filmēšanai no rokas. Operators nodrošināja objektīva fokusēšanu, nepieciešamo tālummaiņu un panoramēšanu, lai izsekotu sportista kustībai visa starta izpildes garumā.

Sportisko kustību pilnveidošanas procesā ir svarīgi sniegt atgriezeniskās saites informāciju sportistiem pēc iespējas ātrāk (būtu vēlams to darīt uzreiz pēc vingrinājuma izpildes), tāpēc apstrādāto vizuālo informāciju katrs sportists saņēma attiecīgās dienas beigās, lai varētu jau nākamajā dienā strādāt pie novēroto kustību nepilnības novēršanas. Kvalitatīvu vizuālo materiālu sagatavošanai izmantotas Simi Motion Twin datora programmatūra (Simi Reality Motion Systems GmbH, Minhene, Vācija), kas ļauj veikt elementāru videoierakstu analīzi, un video montāžas programmatūra Sony Vegas Pro 9.0 (Sony Corporation, Tokija, Japāna). Lai izveidotu DVD-formāta kompaktdiskus ar metodiskiem materiāliem, kas ir augsti novērtēti sportistu un treneru vidū, izmantota DVD-autorešanas programmatūra DVD Architect Pro 5.0 (Sony Corporation, Tokija, Japāna). [5, 35, 61, 68, 94, 132]

2.2. Kameru kalibrēšana

Starts kamaniņu sportā ir sarežģīta kustība un sportista ķermeņa segmenti virzās vairākās plaknēs vienlaicīgi, tādēļ segmentu kinemātisko rādītāju iegūšanai ir nepieciešams veikt ķermeņa punktu telpisko koordinātu rekonstrukciju no videoierakstiem. Tas ir iespējams, ja ir izpildīta telpiskas kalibrēšanas procedūra.

2.2.1. 3D kameru kalibrēšana Simi Motion sistēmā

Objekta telpisku koordinātu rekonstrukcijai jāizpilda divi nosacījumi: (1) interesējošais objekts jānofilmē vienlaicīgi vismaz ar divām (vēlams sinhronizētām) kamerām; (2) pie nemainīgas kameru pozīcijas jānofilmē 3D testa objekts. Objekta filmēšana ar lielāku videokameru skaitu nodrošina precīzāku telpisku koordinātu noteikšanu. Kameru izvietojumam nav nozīmes, bet jānodrošina, lai testa objekts aizpildītu pēc iespējas vairāk telpas, kurā kustās sportists. Apskatāmajiem ķermeņa punktiem jākusťas iekš kalibrētās telpas; ja ķermeņa punkti iziet ārpus šīs telpas, tad to koordinātu aprēķins ir neprecīzs.

Simi Motion SmLaserCalib tool datora programmatūras rīkkopa un Simi Motion datora programmatūras kameru 3D kalibrēšanas modulis ir paredzēti kameru kalibrēšanas parametru (DLT koeficientu) aprēķinam. Balstoties uz šiem parametriem un kombinējot vairākus sinhronus videoierakstus, datora programmatūrā iespējams noteikt interesējošo ķermeņa punktu telpiskās koordinātes. Atbilstoši Simi Motion sistēmas prasībām [55], videokameru kalibrēšana starta estakādē izpildīta kā aprakstīts zemāk.

Visas videokameras sagatavo sportistu kustību reģistrēšanai. Kalibrēšanas sistēmas testa objektu (2.5. att. Simi Motion kalibrēšanas sistēma) novieto estakādes ledus pārklājuma vienā stūrī, tā, lai testa objekts būtu redzams visās kamerās. Tad nosaka apakšējā marķiera centra attālumu līdz ledus pārklājumam. Tā kā sportisti startē sēdus, tad divi testa objekta segmenti ar trīs marķieriem ir pietiekoši, lai vertikālā virzienā pārklātu visu interesējošo telpu. Zinot attālumus starp marķieru centriem (750 mm), kalibrēšanas protokolā aizpilda ailes ar informāciju par marķieru z koordinātēm (4. pielikums). Ar pozīcijas noteikšanas sistēmu (2.1.3. apakšnodaļa un 2.5. attēls) nomēra attālumu līdz testa objekta stienim, to pieņem par sākotnējo pozīciju ar pagrieziena leņķi 0°. Uzsāk videoierakstu reģistrāciju ar visām kamerām un pārvieto testa objektu nākamā pozīcijā tā, lai neizmainītos apakšējā marķiera attālums līdz ledus virsmai.

Katrā pozīcijā nosaka attālumu līdz stienim un tālmēra pagriezienu leņķi. Šo procedūru atkārtoti vairākas reizes (ne mazāk kā četras), tā, lai interesējošā telpā nodrošinātu no 8 līdz 30 punktiem ar zināmām koordinātēm. Pārvietojot testa objektu, tā pozicionēšanas datus katru reizi reģistrē kalibrēšanas protokolā. Izmantojot kalibrēšanas protokola datus ar Simi Motion SmLaserCalib tool datora programmatūras rīkkopu, izveido kalibrēšanas punktu koordinātu matricu. Lai to panāktu, nepieciešams ievadīt testa objekta z koordinātu vērtības datnē *marker.ini* (4. pielikums), tad rīkkopas saskarnes logā definēt testa objekta pozīcijas, sākotnējo pozīciju un X ass virzienu (skat. 4. pielikumu). Programmatūras algoritms ļauj saglabāt iegūto koordinātu matricu kā speciālu datni ar paplašinājumu *.ca3*, kuru var importēt Simi Motion datora programmatūras 3D kalibrēšanas modulī – tas atvieglo darbu kalibrēšanas modulī, jo nav nepieciešams katru reizi no jauna definēt marķieru koordinātes. Pēc punktu koordinātu ievadīšanas 3D kalibrēšanas modulī tos ir nepieciešams kartēt kalibrēšanas videoierakstos, kuros ir attēlots testa objekts. 2.8. attēlā parādīts testa objekta pozīciju attēlojuma piemērs videoieraksta kadrā pēc punktu kartēšanas



2.8. att. Testa objekta pozīciju attēlojums kalibrēšanas videoieraksta kadrā

Minimālais nepieciešamais kalibrēšanas punktu skaits ir 8. Ar lielāku punktu skaitu iespējams palielināt kalibrēšanas precizitāti. Objektīva izkropļojumu korekcija ir iespējama, ja punktu skaits ir ne mazāks kā 12. Atkarībā no pieejamo kalibrēšanas punktu skaita, iespējams izmantot četrus kameru kalibrēšanas algoritmus, šajā darbā izmantots algoritms *DLT-16*, kas sniedz maksimālu kalibrēšanas precizitāti. Pēc punktu kartēšanas iespējams veikt kalibrēšanas precizitātes pārbaudi un nepieciešamības gadījumā ieviest korekcijas.

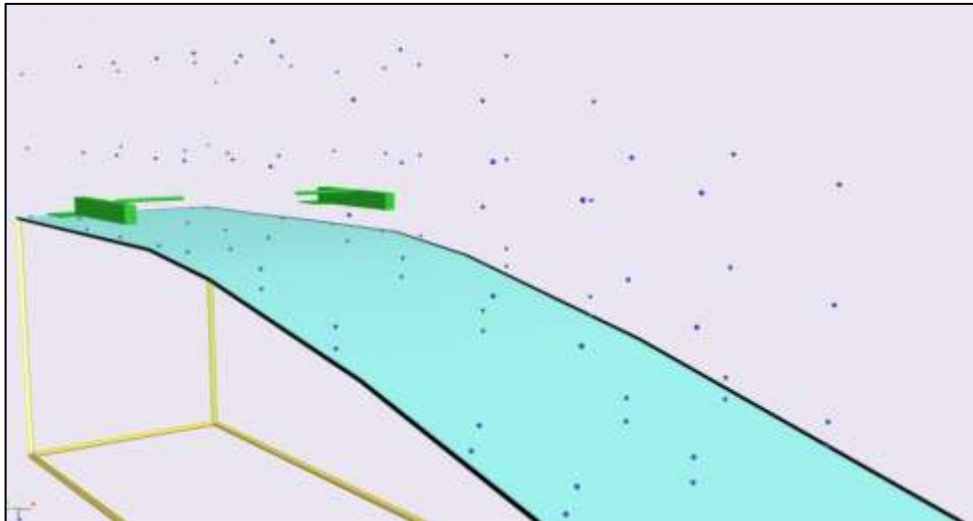
Šim nolūkam paredzēts aprēķinu algoritms *Check calibration*. Kalibrēšanas pārbaudes saskarnes loga piemērs un koordinātu matricas piemērs ir apskatāmi 4. pielikumā. Lai kalibrēšanas punktu koordinātu aprēķins būtu precīzs, videokameru ierakstiem jābūt sinhronizētiem savā starpā. A602fc kamerām sinhronizāciju nodrošina ar ārējo trigeru signālu (kā aprakstīts 2.1.3. apakšnodaļā). Pārējās kameras sinhronizēja pēc vizuālā signāla – tālmēra lāzera uzliesmojuma.

Kalibrēšanas procedūru ar testa objekta marķieru punktu kartēšanu katrai videokameras pozīcijai pietiekoši veikt vienu reizi – iegūtos kalibrēšanas parametrus visiem atbilstošās kameras videoierakstiem tālāk var piesaistīt automātiski.

2.2.2. 3D kameru kalibrēšana ar datora modelēšanas palīdzību

Aprakstītā kalibrēšanas ierakstu reģistrēšanas procedūra ir ļoti darbietilpīgs process, jo ir jānodrošina testa objekta nekustīgums attāluma mērīšanas laikā un redzamība visās videokamerās. Videoierakstu nedrīkst pārtraukt, jo datora programmatūra var izmantot kalibrēšanai tikai vienu nepārtrauktu video nogriezni. Nedrīkst arī pārkodēt videoierakstu mazāka apjoma formātā, jo tas izmaina kadra izšķirtspēju. Pēc katras kameras pārvietošanas vai tālummaiņas koriģēšanas kalibrēšanas procedūra ir jāatkārto. Rezultātā iegūstamo kalibrēšanas videoierakstu kopējais apjoms ir liels un prasa ievērojamus datora cietā diska resursus. Ja video reģistrācijas laikā kameras izkustās no vietas, un jaunai kameru pozīcijai nav atbilstošo kalibrēšanas videoierakstu, iegūtie kustību ieraksti vairs nav derīgi koordinātu rekonstrukcijai. Strādājot ar slīpām virsmām, tādām kā starta estakāde, ir grūti panākt, lai testa objekta vertikālā pozīcija nemainītos relatīvi pret sākotnējo stāvokli. [56] Šo kustību analīzes metodikas nepilnību pārvarēšanai, kalibrēšanas procedūras paātrināšanai un informācijas zudumu samazināšanai kameru izkustēšanās gadījumā izstrādāta jauna pieeja kalibrēšanas procedūrai. Jaunas metodikas izstrādei izmantoti II pētījuma posma videoieraksti un mērījumi.

Izmantojot starta estakādes elementu gabarītu mērījumus un projekcijas no videoierakstiem, vizualizēšanas un 3D modelēšanas datora programmatūrā Autodesk 3ds Max (Autodesk, Inc, Sanrafaela, CA, ASV) tika rekonstruēts telpisks starta estakādes modelis. Sākotnējā informācija par videokameru izvietojumu (no Simi Motion kalibrēšanas moduļa) un projekciju savietošana ļāva 3ds Max programmatūrā rekonstruēt precīzas videokameru pozīcijas un to objektīvu izkropļojumus.

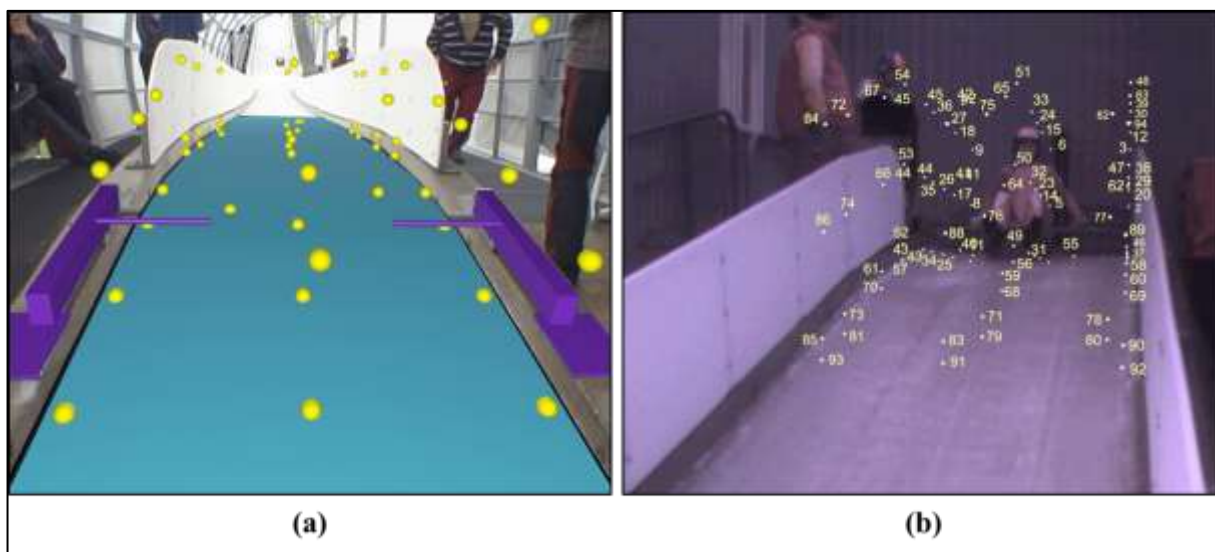


2.9. att. Starta estakādes rekonstrukcija ar „virtuālo marķieru” mākonī

Iegūtajā estakādes modelī tika konstruēti sfēriski objekti ar zināmām centru telpiskajām koordinātēm. Šie objekti modelē Simi Motion lāzera kalibrēšanas sistēmas testa objekta marķierus. Estakādes modelis (rekonstrukcija) ar „virtuālo marķieru” mākonī parādīts 2.9. attēlā.

Izmantojot „virtuālo marķieru” telpisko koordinātu matricu Simi Motion programmatūras 3D kalibrēšanas modulī tika izveidota kalibrēšanas datne `***.ca3` (līdzīgi kā parādīts 5. pielikuma 2. attēlā (a)). Šī koordinātu datne un estakādes modelis ar „virtuālajiem marķieriem” ir jaunās kalibrēšanas metodikas pamats (ērtībai pie katra „virtuālā marķiera” ir pielikts kārtas numurs, 2.9. attēlā numuri nav parādīti).

Jaunā metodika atceļ nepieciešamību reģistrēt kalibrēšanas videoierakstus, kas praksē būtiski atvieglo kustību analīzes realizāciju. Jaunai kameru kalibrēšanas procedūrai var izmantot jau pašus sportista kustības videoierakstus. Jānodrošina, lai nepieciešamais „virtuālo marķieru” skaits būtu vienlaicīgi „redzams” vismaz divās kamerās un katrā videoierakstā būtu vismaz daļēji redzama starta estakāde. Lai kalibrētu kameras, sākumā jāpanāk estakādes modeļa projekcijas pilnīga sakrišana ar atbilstošā videoieraksta projekciju, ko var izdarīt, piemēram, 3ds Max programmatūrā; sākotnējā aptuvenā informācija par kameru izvietojumu (x, y, z koordinātes ar precizitāti līdz dažiem centimetriem) būtiski atvieglo projekciju savietošanu un ļauj rekonstruēt objektīvu izkropļojumus. Sportista kustības videoierakstu pārklātu ar „virtuālo marķieru” mākonī saglabā kā vienotu kalibrēšanas videodatni, un tālākā procedūra sakrīt ar standarta metodiku – kalibrēšanas videodatni importē 3D kalibrēšanas modulī un reālo marķieru vietā kartē „virtuālos marķierus”, piesaistot tiem iepriekš zināmas koordinātu vērtības.



2.10. att. Sportista kustības videoieraksta kadrs pārklāts ar estakādes modeli

(a) videoieraksta kadrs pārklāts ar datora modeli, skats no aizmugures; (b) videoieraksta kadrs pārklāts ar „virtuālo marķieru” mākonī, skats no priekšas, estakādes modeļa līnijas izdēstas.

2.10. attēls demonstrē kadrus no kustību videoieraksta, pārklātus ar „virtuālo marķieru” mākonī pēc savietošanas ar estakādes datora modeļa projekciju. Attēlā (a) uzskatāmībai nav pievienota „marķieru” numerācija, bet attēlā (b) atstāts tikai numurēto „marķieru” mākonis. Videoieraksts ar numurētiem „marķieriem” ir gatavs apstrādei 3D kalibrēšanas modulī.

Kalibrēšanas procedūra ar estakādes datormodeli un zināmām „virtuālo marķieru” koordinātēm ir daudz ātrāka, nekā ierastā kalibrēšanas videoierakstu reģistrācija ar vairākām testa objekta pozīcijām. Izstrādātā procedūra ļauj rekonstruēt interesējošo objektu telpiskās koordinātes pat gadījumos, ja kameras ir mainījušas savu sākotnējo pozīciju. Šajā darbā telpisku koordinātu rekonstrukcija veikta tikai kamaniņu starta estakādes sākuma daļā, bet nepieciešamības gadījumā estakādes modeli ar „virtuāliem marķieriem” var pagarināt un rekonstruēt koordinātes visā estakādes garumā. Izmantotā „virtuālo marķieru” koordinātu matrica ievietota 5. pielikumā.

Jaunās kalibrēšanas procedūras verificēšanai salīdzināti koordinātu rekonstrukcijas rezultāti pēc divu metodiku izmantošanas. Salīdzinājuma rezultāti parādīti 3.1. nodaļā.

2.3. Datu apstrāde

2.3.1. Datu ievadišana un sākotnējā apstrāde

Datu pārvešana datorā no MiniDV videokasetēm veikta izmantojot video tveršanas programmatūru CaptureFlux (Paul Glagla) caur IEEE 1394 interfeisu.

Lai varētu izmantot dažādu videokameru ierakstus viena un tā paša punkta telpisku koordinātu rekonstrukcijai, Simi Motion datora programmatūrai šie ieraksti jāuzdod ar vienādu frekvenci. Sony DCR-HC96E videokamera ieraksta video ar 25 Hz frekvenci pārlecošā rindu izvēršē, bet Basler A602fc kameras – ar 100 Hz. Simi Motion programmatūra ļauj izvērst katru kadru kā divus puskausus. Interpolējot attēlu starp trūkstošām rindām, divdesmit piecu ieraksta kadru vietā iegūst piecdesmit kadrus sekundē. Lai attēlotu 25 kadrus kā 100, pirms ievadišanas Simi Motion programmatūrā Sony kameras videoieraksti tika apstrādāti Sony Vegas Pro videomontāžas programmatūrā. Programmatūras funkcija *Double PAL* izvērš 25 kadrus kā 50 kadrus sekundē. Apstrādāti videoieraksti tika importēti Simi Motion programmatūrā un atkārtoti izvērsti, iegūstot imitētu 100 Hz ieraksta frekvenci. Divreiz izvērstos ierakstos katrs nepāra kadrs ir nepiemērots punktu kartēšanai, bet svarīgi, ka procedūra ļauj panākt Sony kameras ierakstu laika skalas atbilstību A602fc kameru ierakstiem. 2.11. attēls ilustrē kadru izvēršanas rezultātu; visi kadri iegūti no viena videoieraksta ar sākotnējo frekvenci 25 Hz.

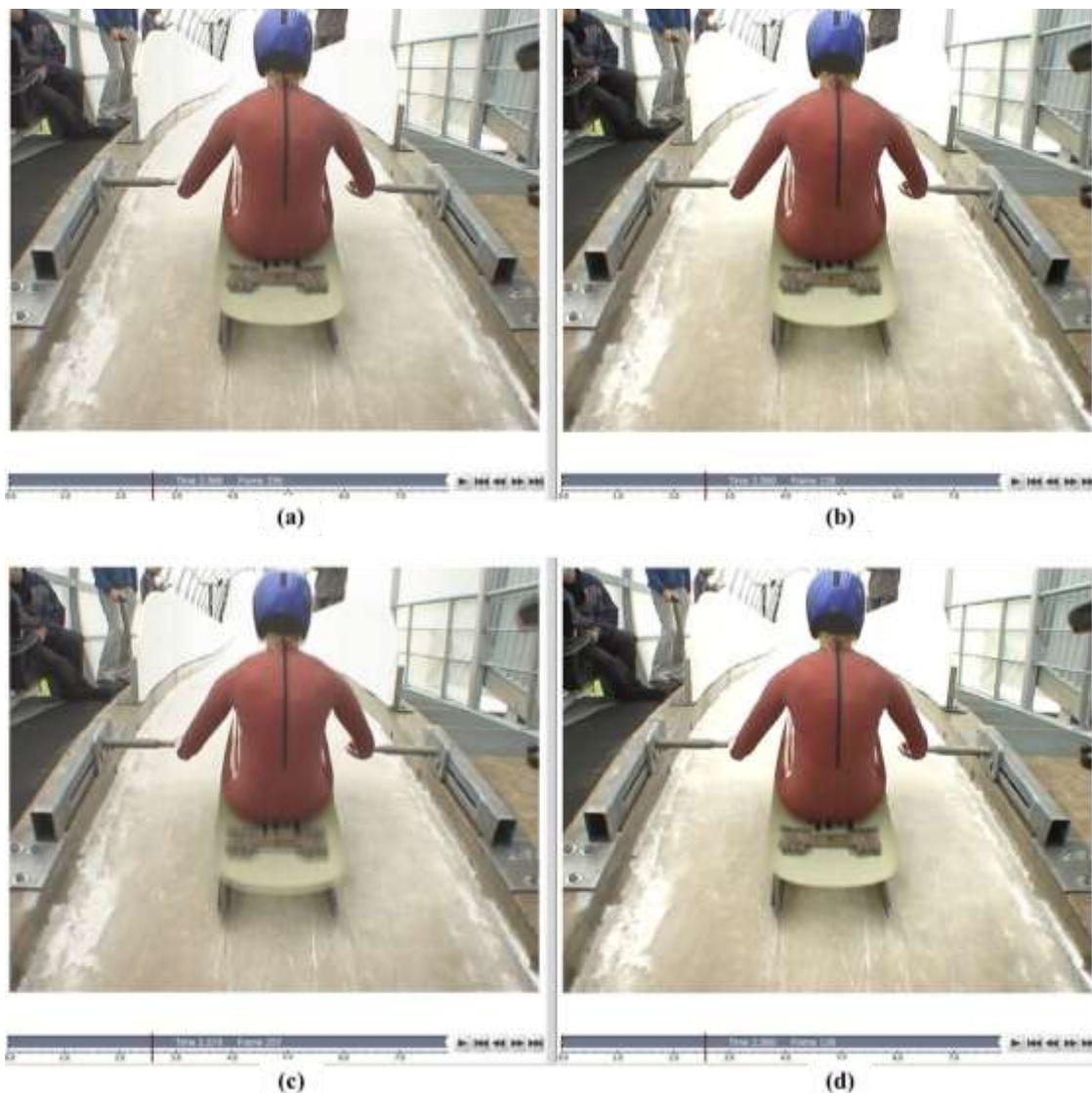
Casio EX-FH20 fotoaparāta iekšējās programmatūras algoritms kodē ātrgaitas videoierakstus NTSC formātā, tāpēc jebkura datorprogrammatūra uztver fotoaparāta videoierakstus kā ierakstītus ar 30 (29,970) kadriem sekundē. Rezultātā laika izvērse neatbilst reālai: katru 210 Hz ieraksta sekundi datora programmatūra atspoguļo kā 7,007 sekundes. Lai aprēķinātu īstos laika parametrus no Casio fotoaparāta ierakstiem, veikt pārrēķins pēc formulas:

$$t = \frac{n}{\text{fps}},$$

kur t – laiks sekundēs;

n – kadru skaits;

fps – videoieraksta frekvence.



2.11. att. 25 Hz videoieraksta kadru izvēršana

(a) videoieraksts pēc divkārtas izvēršanas, rezultējošā frekvence 100 Hz, pāra kadrs, kadra Nr. 256, laika atzīme 2,56 s; (b) videoieraksts pēc parastās izvēršanas, rezultējošā frekvence 50 Hz, pāra kadrs, kadra Nr. 128, laika atzīme 2,56 s; (c) videoieraksts pēc divkārtas izvēršanas, rezultējošā frekvence 100 Hz, nepāra kadrs, kadra Nr. 257, laika atzīme 2,57 s, ir redzams attēla izplūdums; (d) videoieraksts pēc parastās izvēršanas, rezultējošā frekvence 50 Hz, pāra kadrs, kadra Nr. 128, laika atzīme 2,56 s, nav iespējams iegūt laika atzīmi 2,57.

Šī darba ietvaros analīzei izmantoti tikai veiksmīgi starta mēģinājumi. Mēģinājums atzīts par neveiksmīgu, ja sportista rokas noslīd no starta rokturiem, ja brauciena laikā kamanas atduras pret estakādes sienu, vai arī ja sportists zaudē kontroli pār kamanām.

Analīzes nolūkiem starts sadalīts fāzēs pēc Kempe un Thorhauer [51] (skat. 1.1.3. apakšnodaļu) piedāvātā iedalījuma, bet ar dažām modifikācijām.

No analīzes tika izslēgta pirmā un pēdējā Kempe un Thorhauer aprakstītās fāzes. Pirmā fāze (kamanu iestumšana uz priekšu) izslēgta no analīzes, jo pēc tās izpildes sportisti bieži apstājas, un pāreja no 1. uz 2. fāzi nenotiek nepārtrauktā kustībā. Pēdējā fāze – iegulšanās kamanās – izslēgta tāpēc, ka šīs fāzes izpilde starta estakādē atšķiras no izpildījuma trasē sporta celtnu konstruktīvo īpatnību dēļ. Starp 3. (atgrūšanās no starta rokturiem) un 4. (atgrūšanās no ledus) fāzēm izdalīta vēl viena fāze – pāreja no starta rāviens uz atgrūšanos no ledus. Rezultātā analizē iekļautas sekojošas fāzes:

II fāze – kamaniņu ieslidināšana aizmuguriski (fāze mērīta no brīža, kad sākas kamanu kustība aizmuguriski, līdz brīdim, kad kamanas sāk kustēties brauciena virzienā; vadoties no ātruma grafiku analīzes pieņemts, ka kustības virziena maiņa notiek momentāni, kamanu apstāšanās laiks ir neievērojami mazs);

III fāze – starta rāviens (fāze mērīta no II fāzes beigām līdz brīdim, kad abas sportista plaukstas atraujas no starta rokturiem);

IV fāze – pāreja no horizontālā uz slīpo posmu (fāze mērīta no III fāzes beigām līdz brīdim, kad abu roku pirkstgali nonāk kontaktā ar ledu);

V, VI u.t.t. fāze – atgrūšanās no ledus (fāzes mērītas no iepriekšējā pirkstu kontakta ar ledu līdz nākamajam kontaktam ar ledu; fāžu skaits sportistiem variē).

Starta fāžu ilgums noteikts no videoierakstu kadru skaita ar precizitāti līdz sekundes simtdaļai. Starta fāzes ilustrējošās kinogrammas redzamas 1.1.3. apakšnodaļā, 1.4. attēla.

2.3.2. Sportistu ķermeņa segmentu koordinātu noteikšana

Lai aprēķinātu locītavu un citu ķermeņa orientieru koordinātes, Simi Motion programmatūrā veiktas sekojošas darbības:

- katram videoierakstam piesaistīti attiecīgās kameras kalibrēšanas parametri;
- visi viena starta mēģinājuma videoieraksti sinhronizēti savā starpā;
- uzdoti punktu nosaukumi un savienojumi;
- interesējošie punkti kartēti visos videoierakstos;
- sākotnējās (neapstrādātās) koordinātes filtrētas no trokšņiem;
- uzdotajā koordinātu sistēmā aprēķinātas punktu koordinātes un to atvasinājumi.

Simi Motion datora programmatūra izmanto 3D kalibrēšanas modulī iegūtos parametrus, lai rekonstruētu kartēto punktu koordinātes. Telpiskās punktu koordinātes var aprēķināt, ja programmatūrai uzdoti vismaz divi šo punktu kalibrēti videoieraksti no dažādām pozīcijām. Precīzam koordinātu aprēķinam šiem videoierakstiem jābūt sinhronizētiem savā starpā.

Ķermeņa kustību aprakstam nepieciešamie punkti izvēlēti saskaņā ar sekojošām prasībām:

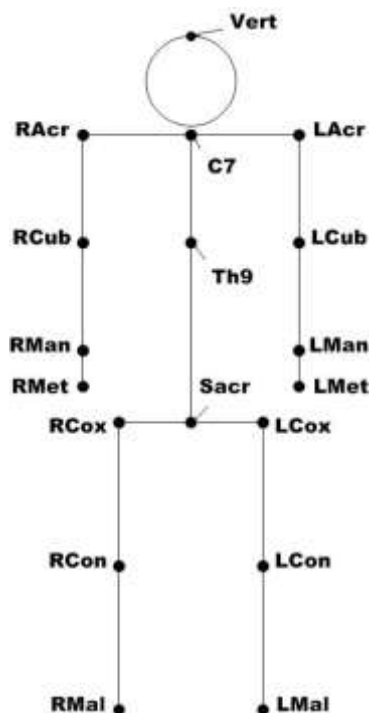
- ISB rekomendācijas potītes, gūžas, mugurkaula, pleca, elkoņa un plaukstas darbības aprakstam; [108, 109]
- noteicošie orientieri cilvēka ķermeņa segmentu inerces parametru aprēķinam pēc de Leva modificētā Zatsiorsky un kol. modeļa; [64, 116, 117, 118, 119]
- pārējie nepieciešamie orientieri. [4, 30, 33, 99, 129]

Izvēlēto punktu apraksts un apzīmējumi sniegti 2.5. tabulā un demonstrēti 2.12. attēlā.

2.5. tabula

Kustību aprakstam izmantotie ķermeņa orientieri

Ķermeņa segments	Ķermeņa orientieris	Apzīmējums	Savienojumi
Galva	<i>Vertex</i>	<i>Vert</i>	x
Roka (labā/kreisā)	Acromion	RAcr/LAcr	RAcr – RCub; RCub – RMan RMan – RMet LAcr – LCub; LCub – LMan LMan – LMet
	Epicondylus lateralis	RCub/LCub	
	Processus styloideus ulnae	RMan/LMan	
	<i>Basis metacarpale III</i>	<i>RMet/LMet</i>	
Kāja (labā/kreisā)	Articulatio coxae	RCox/LCox	RCox – RCon; RCon – RMal LCox – LCon; LCon – LMal
	Condylus lateralis	RCon/LCon	
	Malleolus lateralis	RMal/LMal	
Torss	Vertebra prominens (C7)	C7	RAcr – C7 – LAcr; RCox – Sacr – LCox C7 – Th9 – Sacr
	<i>Sacrum</i>	<i>Sacr</i>	
	<i>Th9/Processus xyploideus</i>	<i>Th9</i>	



2.12. att.. Izmantoto punktu izvietojuma shēma

Kamanu kustības aprakstam izmantots papildus punkts (punkts SLb) kamanu kreisās slieces centrā. Punkti RMet, LMet, Sacr, Th9 kustību analīzes programmā netika kartēti, bet izmantoti kā papildus savienojumi kinemātiskās ķēdes modelī.

6. pielikuma 1. attēlā parādīti Simi Motion programmatūras saskarnes logi ar uzdotiem punktu apzīmējumiem un savienojumiem.

Punktu (orientieru) kartēšana videoierakstos Simi Motion programmatūrā notika manuālā režīmā, kas ir darbietilpīgs process. Kamaniņu braucēju oficiālais sporta tērps [47] ir labi piemērots kustību analīzei, jo cieši pieguļ ķermenim un nerada papildus traucējumus locītavu un citu orientieru kartēšanai.

A602fc kameru ierakstos punkti kartēti katrā kadrā (100 kadri sekundē), Sony DCR-HC96E videokameras ierakstos (pēc divkārtšas kadru izvēršanas) – tikai pāra kadros (50 kadri sekundē). Koordinātes vērtības starp kadriem tiek automātiski interpolētas. 6. pielikuma 2. un 3. attēlā parādīts Simi Motion programmatūras punktu kartēšanas saskarnes logs un koordinātu vērtību grafiki atkarībā no laika ar vērtībām starp kadriem.

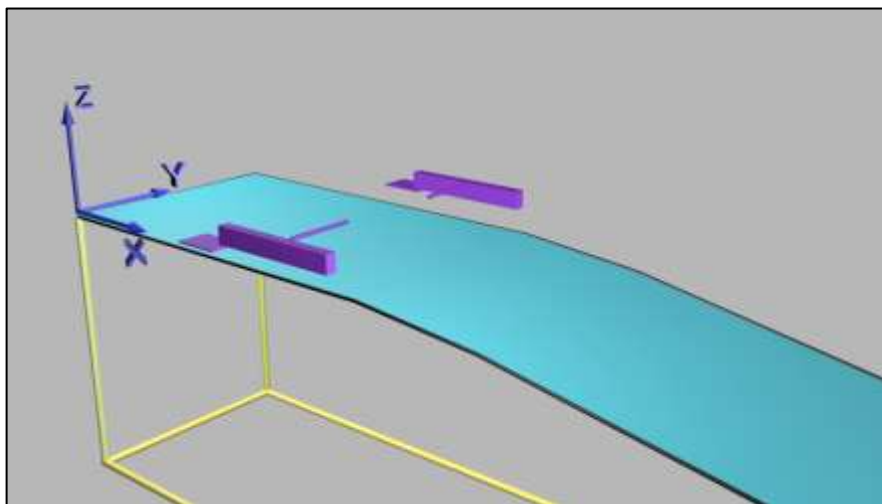
Pēc punktu kartēšanas iegūtais signāls jāfiltrē no trokšņiem. Balstoties uz rekomendācijām literatūrā [6, 21], šajā darbā izmantota vispārināto savstarpēji pārbaudīto piektās pakāpes splainu nogludināšanas metode (generalised cross-validated quintic spline), kas pieejama starp citiem nogludināšanas variantiem Simi Motion datora programmatūras aprēķinu modulī.

Pēc datu filtrācijas programmatūrā izrēķina kartēto punktu 3D koordinātes kalibrētās telpas mērogā. Koordinātu aprēķina precizitāte novērtējama kā $\pm 0,02$ m.

Telpisku koordinātu aprēķinam katram punktam jābūt kartētam vismaz divos kalibrētos videoierakstos. Lielāks videoierakstu skaits palielina koordinātu aprēķina precizitāti. Aprēķinātās punktu koordinātes var eksportēt no Simi Motion programmatūras teksta datnes (.txt) formātā.

2.3.3. Datora modelēšana

Kinemātisko ķēžu analīzei izmantotas mašīnu un mehānismu teorijas metodes. Kinemātisko ķēžu modelēšana un kustību imitēšana veikta izmantojot datora programmatūras Simulink SimMechanics modelēšanas vidi (The MathWorks, Inc., Neitika, Mass., ASV). Ķermeņa segmentu masu un inerces rādītāji aprēķināti pēc de Leva modificētā Zatsiorsky-Seluyanov modeļa (3. pielikums). Segmentu lokālās koordinātu sistēmas izvēlētas saskaņā ar šo modeli: segmenta X ass vērsta priekšēji-mugurēji, Y ass mediolaterāli, Z ass ir segmenta gareniskā ass. [64, 119] Trases datora modelis un starta kustību vizualizēšanas modelis izstrādāti izmantojot 3ds Max datora programmatūru. Darbā ar datormodeļiem koordinātu sistēmas assis vērstas tā, kā parādīts 2.13. attēlā (pasaules koordinātu sistēma).



2.13. att. Izvēlētas koordinātu sistēmas sākumpunkta izvietojums

3. DARBA REZULTĀTI UN TO APSPIEDE

3.1. Telpisku koordinātu rekonstrukcijas metodiku salīdzināšana

Šī darba 2.2. nodaļā aprakstīta kameru kalibrēšanas procedūras punktu telpisku koordinātu rekonstrukcijai kustību analīzes programmatūrā. Tā kā standarta kalibrēšanas procedūras realizācija kamaniņu starta estakādē un citās līdzīgās telpās ir apgrūtināta, kustību analīzes metodikas efektivitātes celšanai tika izstrādāta jauna kalibrēšanas procedūra, kas būtiski atvieglo darbu sportistu treniņu un sacensību apstākļos. Jaunas kalibrēšanas procedūras verificēšanai savā starpā salīdzinātas objektu telpiskās koordinātes, kas aprēķinātas pēc standarta un pēc šajā darbā izstrādātās kalibrēšanas procedūras veikšanas. Kad iespējams, koordinātes salīdzinātas arī ar objektu reālajiem izmēriem. Salīdzināšana veikta trīs etapos. Pirmajā etapā izmantoja tos pašus videoierakstus, no kuriem rekonstruēja estakādes modeli. Standarta kalibrēšanas procedūru izpildīja kā aprakstīts 2.2.1. apakšnodaļā. Pēc kalibrēšanas procedūras starta estakādē nofilmēja divus testa objektus un Simi Motion programmatūrā rekonstruēja objektu telpiskās koordinātes. 3.1. tabulā salīdzināti testa objektu reālie gabarītizmēri un izmēri, kas noteikti Simi Motion programmatūrā pēc divām dažādām kalibrēšanas procedūrām. 3.2. tabulā salīdzināti dažādās estakādes vietās izvietotu testa objektu marķieru koordinātu aprēķina rezultāti. Šeit un tālāk tabulās norādītas vērtības $\pm$ standartnovirze.

Otrajā etapā reģistrēti trīs testa objektu videoieraksti un kalibrēšanas videoieraksti brīvi izvēlētajās videokameru pozīcijās, jaunās kalibrēšanas procedūras realizācijai testa objektu videoieraksti savietoti ar iepriekš izstrādātā estakādes modeļa projekcijām. 3.3. un 3.4. tabulās parādīti otrā etapa salīdzinājuma rezultāti.

Pēdējā salīdzināšanas etapā izmantoti kamaniņu startu videoieraksti, kas iegūti un kalibrēti I pētījuma posmā. Videoieraksti atkārtoti kalibrēti ar jaunizveidoto metodiku. Šajā gadījumā salīdzinātas nevis statiskās koordinātu vērtības, bet dažādu sportistu ķermeņa punktu koordinātu laika funkcijas. 3.1. attēlā kā piemērs parādītas viena sportista gūžas (Cox) un pleca (Acr) punktu x, y, un z koordinātu salīdzinājums II un III starta fāzes izpildes laikā.

3.1. tabula

Koordinātu rekonstrukcijas metodiku pirmais salīdzinājums – testa objektu mērījumi

	Standarta kalibrēšanas procedūra	Modificētā kalibrēšanas procedūra	Objektu reālie izmēri
Objekts 1 – garums, mm	858 ± 2	849 ± 5	850 ± 1
Objekts 1 – platums, mm	702 ± 2	703 ± 1	700 ± 1
Objekts 1 – augstums, mm	118 ± 3	122 ± 1	120 ± 1
Objekts 2 – garums, mm	300 ± 1	298 ± 3	298 ± 1
Objekts 2 – platums, mm	703 ± 1	704 ± 1	702 ± 1
Objekts 2 – augstums, mm	1544 ± 1	1542 ± 1	1541 ± 1

Šeit un tālāk norādītas vidējās vērtības $\pm$ standartnovirze.

3.2. tabula

Koordinātu rekonstrukcijas metodiku pirmais salīdzinājums – punktu koordinātu mērījumi

Punkta Nr.	Standarta kalibrēšanas procedūra			Modificētā kalibrēšanas procedūra		
	x, mm	y, mm	z, mm	x, mm	y, mm	z, mm
1	1333 ± 1	1507 ± 1	137 ± 1	1328 ± 2	1511 ± 2	136 ± 1
2	1586 ± 1	110 ± 1	564 ± 1	1579 ± 1	103 ± 1	564 ± 1
3	1564 ± 1	1544 ± 3	256 ± 2	1568 ± 2	1540 ± 1	257 ± 1
4	2409 ± 1	103 ± 1	738 ± 2	2407 ± 2	105 ± 1	739 ± 1
5	2435 ± 1	127 ± 1	259 ± 1	2434 ± 1	130 ± 2	259 ± 1
6	2438 ± 1	1411 ± 2	256 ± 1	2439 ± 2	1410 ± 3	262 ± 1
7	2647 ± 3	92 ± 1	259 ± 1	2645 ± 1	94 ± 1	260 ± 1
8	3136 ± 2	21 ± 1	265 ± 1	3139 ± 1	19 ± 1	264 ± 2
9	4325 ± 1	456 ± 3	648 ± 2	4328 ± 1	455 ± 2	647 ± 1
10	5182 ± 2	637 ± 2	271 ± 2	5182 ± 2	640 ± 2	269 ± 1

3.3. tabula

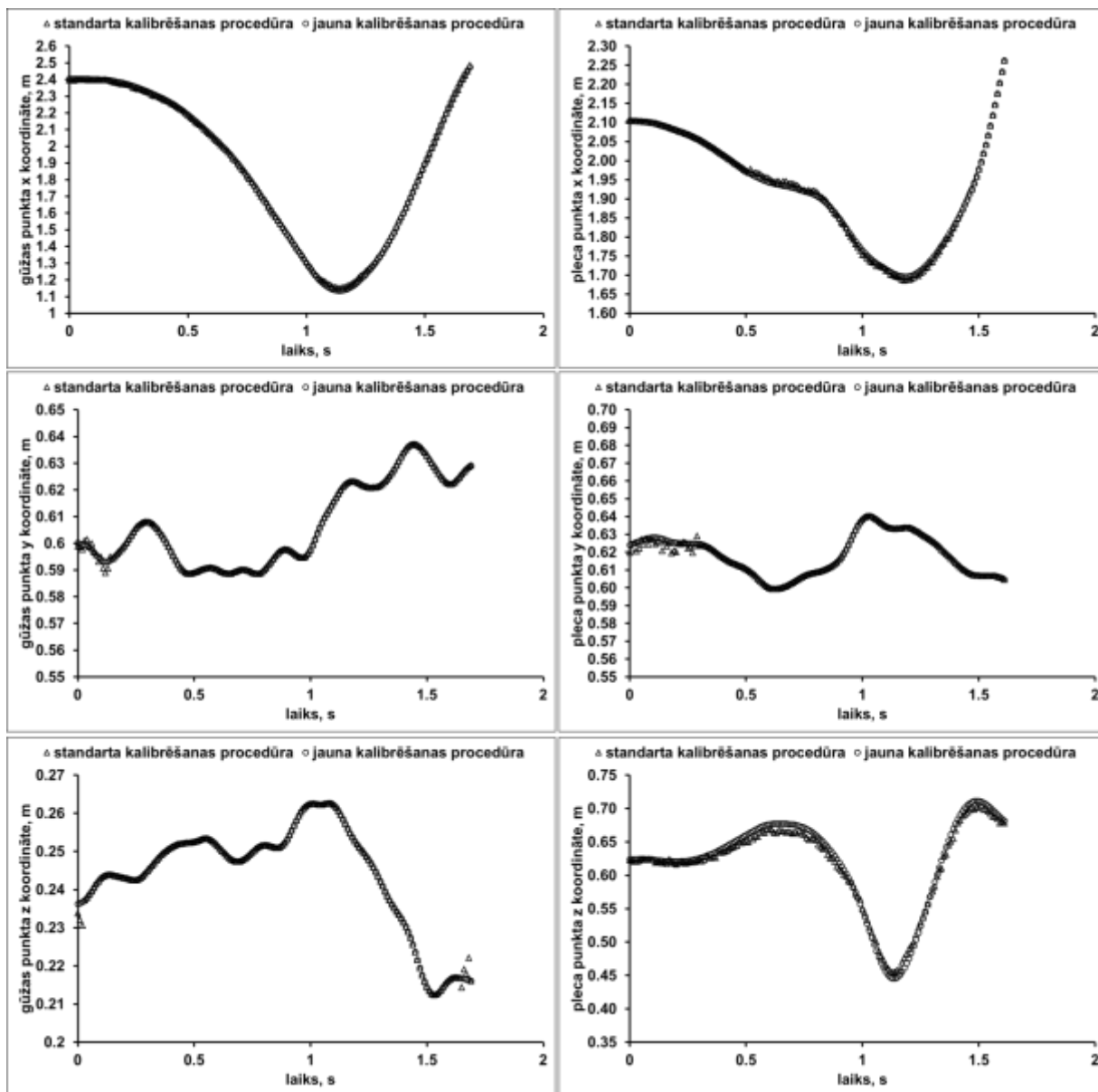
Koordinātu rekonstrukcijas metodiku otrais salīdzinājums – testa objektu mērījumi

	Standarta kalibrēšanas procedūra	Modificētā kalibrēšanas procedūra	Objektu reālie izmēri
Objekts 1 – garums, mm	848 ± 2	851 ± 1	850 ± 1
Objekts 1 – platums, mm	703 ± 1	702 ± 2	700 ± 1
Objekts 1 – augstums, mm	122 ± 1	120 ± 2	120 ± 1
Objekts 2 – garums, mm	299 ± 2	297 ± 1	298 ± 1
Objekts 2 – platums, mm	700 ± 1	702 ± 2	702 ± 1
Objekts 2 – augstums, mm	1539 ± 1	1540 ± 1	1541 ± 1
Objekts 3 – garums, mm	297 ± 1	295 ± 2	298 ± 1
Objekts 3 – platums, mm	1570 ± 1	1569 ± 1	1570 ± 1
Objekts 3 – augstums, mm	404 ± 2	405 ± 1	405 ± 1

3.4. tabula

Koordinātu rekonstrukcijas metodiku otrais salīdzinājums – punktu koordinātu mērījumi

Punkta Nr.	Standarta kalibrēšanas procedūra			Modificētā kalibrēšanas procedūra		
	x, mm	y, mm	z, mm	x, mm	y, mm	z, mm
1	567 ± 1	17 ± 1	56 ± 1	569 ± 1	17 ± 1	54 ± 1
2	1234 ± 2	1538 ± 2	467 ± 1	1235 ± 1	1539 ± 1	466 ± 2
3	2340 ± 1	194 ± 2	155 ± 2	2336 ± 1	194 ± 2	156 ± 1
4	2418 ± 1	12 ± 2	264 ± 1	2413 ± 2	6 ± 1	260 ± 2
5	2413 ± 2	148 ± 1	264 ± 1	2417 ± 3	147 ± 2	264 ± 1
6	2647 ± 2	1609 ± 1	589 ± 2	2645 ± 1	1610 ± 2	587 ± 1
7	3838 ± 1	71 ± 1	257 ± 3	3837 ± 1	68 ± 1	256 ± 1
8	4263 ± 3	267 ± 1	786 ± 1	4265 ± 2	267 ± 1	788 ± 1
9	4500 ± 1	456 ± 1	56 ± 1	4498 ± 2	455 ± 1	57 ± 1
10	5623 ± 2	782 ± 2	316 ± 1	5626 ± 1	782 ± 1	314 ± 2



3.1. att. Kalibrēšanas procedūru salīdzināšana – gūžas un pleca punktu x, y un z koordinātes

Pēc tabulu datiem redzams, ka pēc divām kalibrēšanas metodikām rekonstruētās objektu telpiskās koordinātes gandrīz pilnībā sakrīt savā starpā (atšķirība nepārsniedz 6 mm). Līdzīgu secinājumu var izdarīt arī no koordinātu laika funkciju grafikiem. 3.1. un 3.3. tabulu dati apstiprina, ka abas izmantotās metodikas ļauj aprēķināt objektu izmērus atbilstoši objektu reālajiem izmēriem. Iegūtie rezultāti demonstrē, ka jaunizveidotā metodika ir derīga telpisku koordinātu rekonstrukcijai no videoierakstiem un nesamazina koordinātu noteikšanas precizitāti salīdzinājumā ar standarta metodiku.

Izveidojot atbilstošus datormodeļus, jauno metodiku var adaptēt arī citu telpu kalibrēšanai. Nepieciešamais nosacījums ir nodrošināt telpās nekustīgus references objektus, kas atvieglos datormodeļa projekciju savietošanu ar videoierakstu projekcijām (par references objektiem var kalpot, piemēram, starta rokturu turētāji kamaniņu estakādē, starta paaugstinājumi peldbaseinā u.tml.). Izstrādātais estakādes datormodelis ir derīgs arī skeletona un bobsleja starta analīzei – pietiek tikai pagarināt modeli līdz šo sporta veidu starta vietai. 5. pielikumā ievietota izmantotā „virtuālo marķieru” koordinātu matrica un estakādes modeļa projekcijas savietotas ar projekcijām no videoierakstiem. Jaunās kalibrēšanas metodikas galvenais trūkums ir specializētās 3D modelēšanas datora programmatūras nepieciešamība.

3.2. Starta izpildes laika analīze

Vingrinājuma izpildes laiks ir galvenais vērtēšanas kritērijs daudzos sporta veidos, tai skaitā arī kamaniņu sportā, kurā sacensību mērķis ir pārvarēt trasi iespējami īsākā laikā. [13, 47, 80, 124] Labākai izpratnei par kamaniņu sportā notiekošiem procesiem pirms pašas starta kustības modelēšanas īsumā analizēti galvenie startu raksturojošie laika parametri.

3.2.1. Starta un finiša laika korelācija Siguldas kamaniņu trasē

Veiksmīgs starts tiek uzskatīts par nepieciešamu priekšnosacījumu labam rezultātam finišā visos „slīdēšanas” sporta veidos, un vairākās pasaules trasēs ir noteikts starta un finiša laika korelācijas koeficients. [14, 34, 88, 113] Tā kā Siguldas trasei šāda informācija nebija pieejama, tad šī darba ietvaros savākti nepieciešamie dati un aprēķināts kamaniņu sporta starta un finiša laiku korelācijas koeficients arī Latvijas vienīgai trasei.

Koeficients noteikts pēc FIL oficiālo sacensību (Pasaules kausa posmi, Pasaules čempionāti, Eiropas čempionāti) protokolu datiem sievietes un vīriešu individuālajās disciplīnās (izmantota 1.1.2. apakšnodaļā aprakstītā metodika). Analizēti vairāk nekā 300 mēģinājumi katrā sportistu grupā pēdējo piecu gadu laikā (no 2006./2007. gada sezonas līdz 2010./2011. gada sezonai). Analīzes rezultāti apkopoti 3.5. tabulā. Aprēķinātie Spīemena ρ koeficienti norāda uz vāju līdz mērenu korelāciju starp starta laiku un līdz finišam atlikušo laiku. Acīmredzami Siguldas trasē starta laiks viennozīmīgi neizšķir brauciena rezultātu, bet dažādās pasaules trasēs starta posma ietekme uz rezultātu ir atšķirīga (piemēram, Liellahammeres trasē starta un finiša laika korelācijas koeficients sasniedz 0,74).

Starta un finiša laika analīze Siguldas kamaniņu trasē 2006./2007. – 2010./2011. gadu sezonās

	Sievietes, n = 312	Vīrieši, n = 302
Vidējais starta laiks, s	1,892 ± 0,049	4,659 ± 0,179
Vidējais laiks finišā, s	43,683 ± 0,671	49,709 ± 1,220
Starta laika daļa no finiša laika, %	4,3 ± 0,1	9,4 ± 0,3
Spīrmena ρ korelācijas koeficients*	0,48**	0,36**

* Korelācijas koeficients aprēķināts starp starta posma laiku un laiku, kas palicis līdz finišam pēc starta posma pārvarēšanas.

** Statistiski nozīmīga korelācija pie nozīmības līmeņa $\alpha = 0,05$.

Ņemt vērā salīdzinoši augstus korelācijas koeficientus dažādās pasaules trasēs un to, ka starta posma pārvarēšana visās trasēs aizņem tikai nelielu daļu no kopējā brauciena laika (līdz 10%), nevar noliegt šī posma būtiskumu teicama sportiska rezultāta sasniegšanai. Veiksmīga starta izpilde trasē palielina iespējas pārvarēt atlikušo trases daļu bez kļūdām un īsākā laikā. Gatavojoties sacensību sezonai „slīdēšanas” sporta veidos, starta tehnikas apgūšanai un starta laika uzlabošanai tiek veltīta liela uzmanība. Jāatzīmē, ka starts ir vienīgas tehnikas elements, ko sportisti var atstrādāt starpsezonu laikā, kad ledus pārklājums trasēs nav pieejams.

3.2.2. Laika mērījumi Siguldas starta estakādē

Treniņu laikā starta estakādē reģistrē divus laika parametrus – „pilnu” starta laiku (t_f) pie estakādes slīpā posma beigām un „augšējo” laiku (t_a), kas raksturo starta rāvienu un pirmo atgrūšanos no ledus (skat. 2.1.4. apakšnodaļu). 3.6. tabulā parādītas reģistrēto laika parametru vidējās vērtības katram pētījuma dalībniekam visos pētījuma posmos (tikai veiksmīgi izpildītajiem startiem).

Ļoti mazas laika vērtību variācijas dēļ (kas saistīts ar laika precizitātes mērījumu ierobežojumu – sekundes simtdaļa) nebija iespējams veikt t_a un t_f vērtību regresijas analīzi sieviešu grupā. Vīriešu grupā t_a laiks izskaidro vairāk nekā pusi no ($t_f - t_a$) laika dispersijas, ja pēdējais fotoelementu pāris izvietots vēl uz estakādes slīpās daļas (pētījuma posmi I un III), un nedaudz mazāk par 40%, ja pilno starta laiku reģistrē jau bremsēšanas taisnē (pētījuma posms IV). Laika parametru lineārās regresijas determinācijas koeficienti (R^2) vīriešu grupai iekļauti 3.6. tabulā.

3.6. tabula

Vidējie pētījuma dalībnieku starta laiki estakādē

Sportists	I posms		III posms		IV posms	
	t_a (3 m), s	t_f (15 m), s	t_a (3 m), s	t_f (18 m), s	t_a (3 m), s	t_f (25,30 m), s
A1	0,70 $\pm 0,02$	2,38 $\pm 0,02$	—	—	—	—
A2	0,70 $\pm 0,01$	2,39 $\pm 0,02$	0,69 $\blacklozenge$ $\pm 0,01$	2,71 $\pm 0,03$	0,71 $\pm 0,01$	3,57 $\pm 0,03$
B1	0,71* $\pm 0,01$	2,41* $\pm 0,02$	—	—	0,72* $\blacklozenge$ $\pm 0,01$	3,57 $\pm 0,02$
B2	0,69* $\pm 0,01$	2,41* $\pm 0,02$	0,68 $\blacklozenge$ $\pm 0,01$	2,71 $\pm 0,02$	0,70 $\pm 0,01$	3,59 $\pm 0,02$
C	0,60* $\pm 0,01$	2,18* $\pm 0,02$	0,60* $\pm 0,001$	2,50 $\pm 0,002$	—	—
D1	0,66 $\pm 0,002$	2,29* $\pm 0,004$	0,66* $\pm 0,002$	2,62* $\pm 0,003$	0,66 $\pm 0,01$	3,44 $\pm 0,01$
D2	0,65 $\pm 0,01$	2,27 $\pm 0,01$	—	—	0,66 $\blacklozenge$ $\pm 0,01$	3,41* $\pm 0,01$
D3	0,61* $\pm 0,002$	2,21* $\pm 0,01$	0,61 $\pm 0,001$	2,51 $\pm 0,002$	0,62* $\blacklozenge$ $\pm 0,01$	3,34* $\pm 0,01$
R^{2**}	0,54		0,74		0,38	

* Statistiski nozīmīga atšķirība kolonnā atbilstošā (sieviešu vai vīriešu) grupā;

 $\blacklozenge$ Statistiski nozīmīga atšķirība rindā starp t_a vērtībām;

** Determinācijas koeficienti vīriešu grupai.

Iegūtie dati saskaņojas ar Platzer un kol. [80] publicētiem rezultātiem par augstu negatīvu korelācijas koeficientu starp kamanu ātrumu starta rokturu atlaišanas brīdī un starta izpildes laiku trasē. Literatūrā jau iepriekš atzīmēts, ka darbībām estakādes slīpajā posmā ir mazāka ietekme uz starta izpildes laiku. [61] Pēc 3.6. tabulas datiem redzams, ka atkarībā no estakādes garuma, starta sākumfāzes var izskaidrot līdz pat 74% no kopējā starta laika dispersijas. Tāpēc detalizētāks ieskats šo fāžu kustību īpatnībās ir šķietami perspektīvs ceļš kopējā starta laika uzlabošanai.

3.2.3. Starta fāžu izpildes laiks

Šajā darbā analizējamās starta fāzes apskatītas 2.3.1. apakšnodaļā un iekļauj „kompresijas” fāzi (II fāze), starta rāvienu (III fāze), pāreju no starta rokturiem uz estakādes slīpo daļu (IV fāze) un vairākas atgrūšanās no ledus slīpajā daļā (V un turpmākās fāzes).

Katram sportistam ir aprēķināti šo fāžu vidējie ilgumi 100 sekmīgos mēģinājumos, aprēķinu rezultāti ir apkopoti 3.7. tabulā. Fāžu laiks nav primārais starta tehnikas vērtēšanas kritērijs, jo sportistiem atšķiras kamanu noietie attālumi katrā fāzē, taču fāžu laika novērtēšana sniedz priekšstatu par kopējo starta izpildes raksturu.

3.7. tabula

Starta fāžu vidējais ilgums sportistiem

Sportists	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
A1	0,89 ± 0,04	0,59 ± 0,01	0,28✦ ± 0,01	0,48 ± 0,01	0,46✦ ± 0,01	0,45✦ ± 0,01	0,46✦ ± 0,02	X
A2	1,03✦ ± 0,02	0,61✦ ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,52✦ ± 0,01	0,46✦ ± 0,01	0,45*✦ ± 0,01	0,44* ± 0,02	X
B1	0,83" ± 0,07	0,61✦ ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,53 ± 0,02	0,49*" ± 0,01	0,48*" ± 0,02	0,46✦ ± 0,02	X
B2	1,08✦ ± 0,09	0,56" ± 0,01	0,35 ± 0,02	0,57 ± 0,02	0,53 ± 0,02	0,51* ± 0,03	0,49* ± 0,03	X
C	0,80" ± 0,02	0,56" ± 0,01	0,28✦ ± 0,01	0,51* ± 0,03	0,49*" ± 0,02	0,49*" ± 0,02	X	X
D1	0,98 ± 0,01	0,56" ± 0,01	0,32 ± 0,01	0,54 ± 0,01	0,52* ± 0,01	0,52* ± 0,01	X	X
D2	0,64 ± 0,01	0,55 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,44 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,39 ± 0,01	0,38 ± 0,01
D3	0,81" ± 0,09	0,52 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,52✦ ± 0,02	0,50*" ± 0,02	0,49*" ± 0,01	X	X

norādīts laiks sekundēs;

* – nav novērota statistiski nozīmīga atšķirība no līdzīgi atzīmētām vērtībām rindā;

✦, " – nav novērota statistiski nozīmīga atšķirība no līdzīgi atzīmētām vērtībām ailē.

Redzams, ka „kompresijas” fāzes (II fāze) ilgums visvairāk atšķiras starp sportistiem. Tas ir izskaidrojams ar relatīvu izpildes brīvību, kas salīdzinājumā ar pārējām fāzēm raksturo starta II fāzi. Kamanu noietā distance šajā fāzē atkarīga ne tikai no sportistu lokanības un antropometriskiem rādītājiem, bet arī no tā, cik tālu kamanas tiek izvirzītas uz priekšu I starta fāzes beigās. Pagaidām nav izstrādāts optimālais fāžu izpildes modelis, un sportisti individuāli piemeklē sev piemērotāku pozīciju I fāzes beigās. Pārējās starta fāzes visi sportisti cenšas izpildīt pēc iespējas ātrāk un spēcīgāk, kas rezultātā samazina variāciju šo fāžu izpildes laikā. Pieaugot kamanu ātrumam slīpajā estakādes daļā, sportistu „atgrūšanās” fāžu laikam ir tendence saīsināties, ko var novērot tabulā no V līdz pēdējai fāzei.

Fāžu ilgums nediferencē sieviešu sportistu grupu no vīriešu grupas, bet raksturo katru sportistu individuāli. Nav atrasti statistiski nozīmīgi korelācijas koeficienti starp sākotnējo fāžu (II un III fāzes) izpildes laiku un „augšējo” vai pilno starta laiku, un tas atkārtoti norāda, ka fāžu laika parametri tīrā veidā, bez kinemātisko un dināmisko rādītāju ietekmes novērtēšanas, neraksturo starta kustības izpildes efektivitāti. Tāpēc kinemātisko un dināmisko rādītāju noteikšana ir viens no galvenajiem uzdevumiem starta biomehāniskajā analizē.

3.2.4. Starta izpildes uzlabošanas novērtējums estakādē

Treniņu uzdevums starta estakādē ir uzlabot starta izpildes tehniku un panākt starta posma pārvarēšanu iespējami īsākā laikā. Pētījuma dalībnieku kustību tehnikas pilnveides progresa novērtēšanai aprēķināta sportistu veiksmīgo startu daļa no kopējā estakādē izpildīto startu skaita (par veiksmīgiem uzskatīti starti, kad sportista rokas nav noslīdējušas no starta rokturiem un nav paslīdējušas kontaktā ar ledu, bet kamanas savā kustībā nav būtiski novirzījušās no taisnas trajektorijas). Salīdzināti I un III pētījuma posmu dati (IV posmā nav reģistrēts pietiekošs starta mēģinājumu skaits). Aprēķinu rezultāti parādīti 3.2. attēlā.

Kā redzams, salīdzinājumā ar 2009./2010. gada sezonu (I pētījuma posms), 2010./2011. gada sezonā (III pētījuma posms) visiem pētījuma dalībniekiem novērojams veiksmīgi izpildīto startu skaita pieaugums procentos no kopējā startu skaita. Veiksmīgu startu skaita pieaugums ir vairāku faktoru mijiedarbības rezultāts, kā galvenos var minēt sekojošus.

(1) Estakāde nodota ekspluatācijā 2009. gada augustā, tāpēc I pētījuma posmā estakādes treniņi ienāca programmā kā jauninājums, un sportisti tikai sāka iepazīt estakādes īpatnības, bet uz 2010. gadu treniņi estakādē jau iegājuši rutīnas programmā.

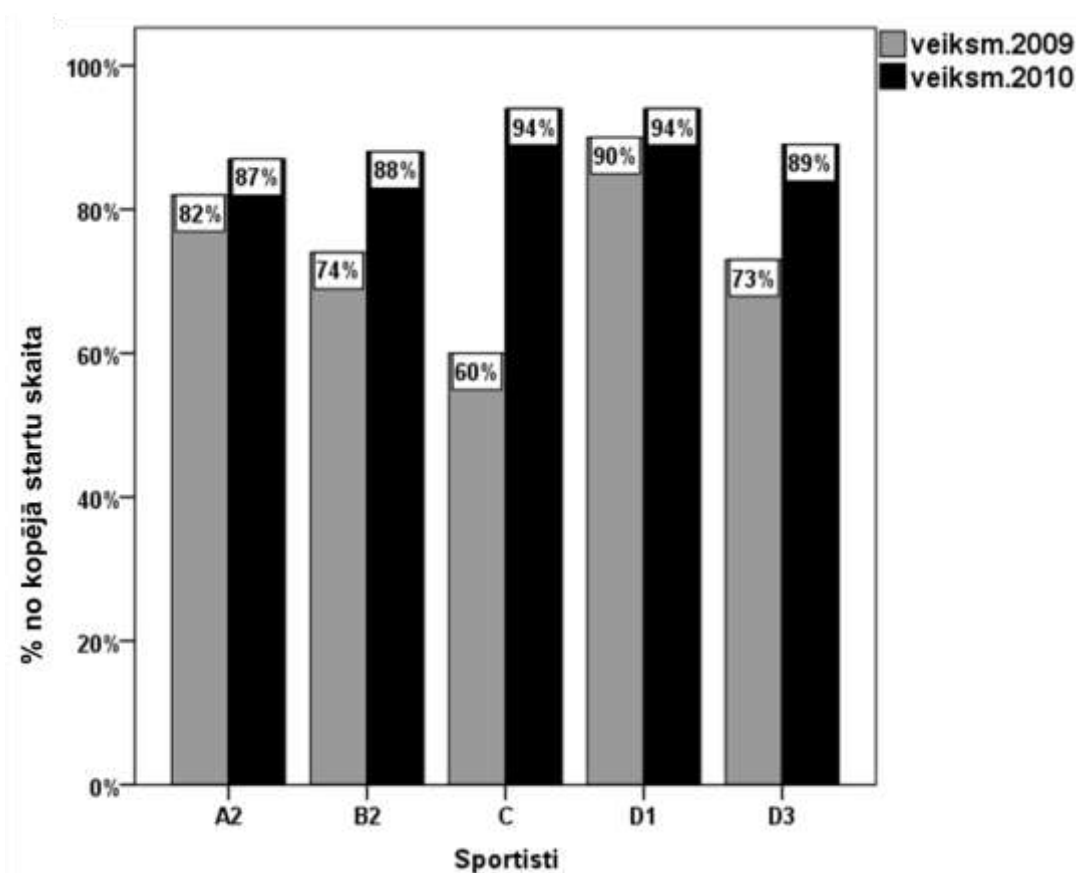
(2) Ar 2009./2010. gada sezonu treniņu atgriezeniskā saitē sportistiem piedāvāta plaša vizuālā informācija par individuāliem starta mēģinājumiem, kas ļāva sportistiem kvalitatīvi

novērtēt tekošās dienas treniņa rezultātu un strādāt pie tehnisko kļūdu labošanas jau nākamajā dienā, kas ilgtermiņā pozitīvi ietekmēja starta tehniku.

(3) Ilgstošu specifiski ievirzītu treniņu rezultātā ir pieaugusi sportistu meistarība starta izpildē.

(4) Ir uzlabojusies sportistu fiziskā sagatavotība.

Augstākajā sportiskā līmenī ir svarīgi pievērst uzmanību visām detaļām, īpaši uzsverot katra sportista individuālās īpatnības, tādēļ ir lietderīgi rūpīgi analizēt starta tehnikas elementus, ieskaitot tās kinemātiskos un dinamiskos aspektus. Treniņi starta estakādē sniedz iespēju savākt daudz lielāku analīzei nepieciešamo datu apjomu, nekā tas būtu iespējams trasē par to pašu laika periodu.



3.2. att. Veiksmīgi izpildīto starta mēģinājumu skaits procentos no kopējā starta mēģinājumu skaita starta estakādē 2009./2010. un 2010/2011. gadu sezonās

3.3. Kamanīņu starta datora modelis

Noskaidrots, ka sākotnējās starta fāzes spēlē būtiski ietekmē starta rezultātu, un arī pēc sportistu un treneru subjektīvā novērtējuma, starta rāviens ir viens no galvenajiem elementiem starta izpildē. Tāpēc šī darba ietvaros izstrādātais starta kinemātiskais modelis ietver II un III starta fāzes, no kamanu iekustināšanas uz aizmuguri līdz rokturu atlaišanas brīdim. Šo fāžu kopējais izpildes laiks ir īss un visiem sportistiem nepārsniedz 2 sekundes (3.7. tabula).

No kustības uzsākšanas un līdz starta III fāzes beigām (atraušāns no starta rokturiem) sportista ķermenis un kamanas veido nepārtraukti noslēgto kinemātisko ķēdi, kas pārvēršas par atvērtu pēc tam, kad sportists atgrūžas no rokturiem. Pievelkoties pie starta rokturiem un atgrūžoties no tiem, sportists pieliek spēku kamanu paātrināšanai. Pievilkšanās fāze ir īsa – tā sastāda tikai daļu no III starta fāzes, bet bez speciālām mērīšanas iekārtām starta rokturos praktiski nav iespējams noteikt spēka pielikšanas virziena izmaiņas brīdi.

3.3.1. Estakādes datora modelis

Kalibrēšanas metodikas izstrādes procesā rekonstruētā estakādes datora modeļa attēls redzams 2.2.2. apakšnodaļā (2.9. attēls). Estakādes modelis sastāv no četriem posmiem: horizontālais posms 2,52 m garumā, pārējie posmi veido 6° , 11° un 14° leņķus ar horizontāli, atbilstošie posmu garumi ir 0,80 m, 1,50 m, pēdējais posms rekonstruēts 6,03 m garumā. Pirmie trīs posmi pilnībā atbilst reālajai estakādes konstrukcijai, bet pēdējais, stāvākais posms nav modelēts pilnā garumā. Reālajā estakādē šim posmam seko bremzēšanas taisne (2.1. attēls (a)).

Pirms starta modeļa izstrādes novērtēsim kamanu pozīciju estakādē II un III starta fāzēs, lai pārbaudītu, vai starta sākotnējo kustību izpildes laikā kamanas iziet ārpus horizontālā estakādes posma. 3.8. tabulā ir parādītas kustību analīzes rezultātā iegūtās SL_b x koordinātes vērtības visiem sportistiem. Katram sportistam aprēķinātas vidējās koordinātes vērtības no 30 veiksmīgiem starta mēģinājumiem. Pēc tabulas datiem redzams, ka III starta fāzes beigās visu sportistu kamanu slieču centrs ir atstājis estakādes horizontālo posmu ($x_{SL_b} > 2,52$), bet neiziet ārpus pirmā slīpā posma, kas veido 6° leņķi ar horizontāli (pirmo divu estakādes posmu kopējais garums sastāda 3,32 m). Starta II fāzes sākumā gandrīz visu sportistu kamanas arī atrodas estakādes pirmajā slīpajā posmā, izņemot sportisti B1, kuras kamanas nav atstājušas horizontālo platformu.

Sportistu kamanu pozīcija starta II un III fāzē

Sportists	Punkta SLb x koordināte II fāzes sākumā, m	Punkta SLb x koordināte III fāzes sākumā, m	Punkta SLb x koordināte III fāzes beigās, m
A1	$2,78 \pm 0,03$	$1,40 \pm 0,02$	$2,90 \pm 0,02$
A2	$2,70 \pm 0,02$	$1,38 \pm 0,02$	$3,02 \pm 0,03$
B1	$2,40^* \pm 0,05$	$1,22 \pm 0,04$	$2,85 \pm 0,03$
B2	$2,68 \pm 0,02$	$1,33 \pm 0,02$	$2,94 \pm 0,02$
C	$2,76 \pm 0,02$	$1,12 \pm 0,02$	$3,03 \pm 0,02$
D1	$2,64 \pm 0,06$	$1,33 \pm 0,02$	$3,09 \pm 0,02$
D2	$2,74 \pm 0,05$	$1,29 \pm 0,02$	$3,11 \pm 0,02$
D3	$2,59 \pm 0,06$	$1,33 \pm 0,03$	$3,03 \pm 0,03$

Horizontālā un pirmā slīpā estakādes posma kopējais garums ir 3,32 m.

* Punkta SLb x koordināte neiziet ārpus estakādes horizontālā posma ($l = 2,52$ m).

Vadoties no iegūtiem datiem, starta modelī var pieņemt, ka II un III starta fāžu izpildes laikā kamanas kustās starp horizontālo un pirmo slīpo estakādes posmu. Ņemot vērā šī posma slīpumu un garumu, z koordinātes atšķirība posma beigās salīdzinājumā ar horizontālo platformu pieaugs līdz 0,08 m ($\sin 6^\circ = 0,105$), bet slīpā posma vidū sasniegs 0,04 m, kas pārsniedz kustību analīzes mērījuma kļūdas robežas. Tādēļ apskatāmajās starta fāzēs kamanu vertikālu kustību nevar pielīdzināt nullei. Tas ir jāņem vērā modelējot kamanu segmenta brīvības pakāpes.

3.3.2. Sākotnējie pieņēmumi un to pārbaude

Sportista kustību modelēšanai starta izpildes laikā izmantots vispārīgais cilvēka ķermeņa modelis, kura segmenti pieņemti par absolūti cietiem ķermeņiem (līdzīgi kā parādīts 1.6. un 2.12. attēlos). Segmenti savienoti kopējā segmentu punktā ar locītavu starpniecību, pieņemts, ka locītavās berze nepastāv. Izmantoto savienošanas punktu (locītavu) apzīmējumi redzami 2.5. tabulā un 2.12. attēlā. Pieņemts, ka tiek modelēts tehniski pareizi izpildīts starta mēģinājums, un ir izdarīti vēl daži sākotnējie pieņēmumi, kas izskatīti zemāk. Sākotnējo pieņēmumu pārbaude balstās uz pētījuma dalībnieku starta mēģinājumu kinemātisko datu vidējām vērtībām (no 30 veiksmīgiem mēģinājumiem katram sportistam).

Kamanu segments – segments SL

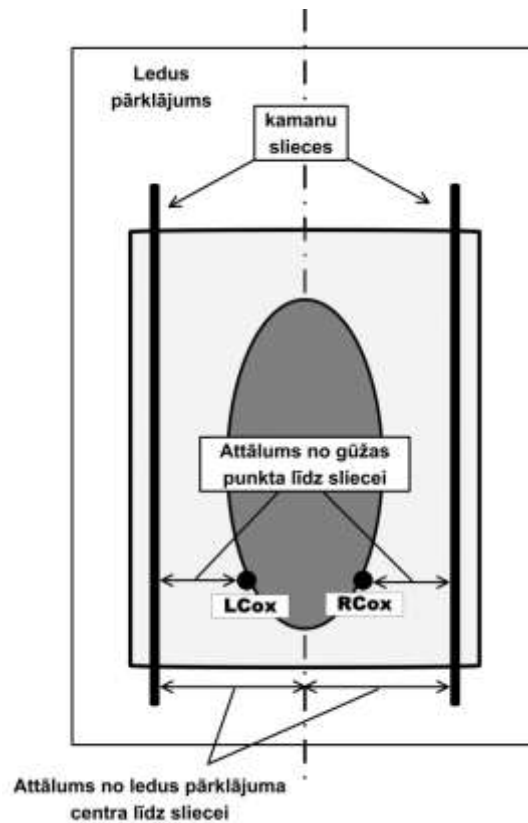
Kamanas modelē segments SL, un ir pieņemts, ka:

1. Kamanas ir absolūti ciets viendabīgs ķermenis, griezumā taisnstūris ar izmēriem $L \times W \times H$ (garums $\times$ platums $\times$ augstums); izmēri ir individuāli katram sportistam.
2. Kamanu masa ir 23 kg, galvenie inerces momenti aprēķināti kā taisnstūra paralēlskaldnim.
3. Kamanu segmenta koordinātu sistēmas asu virzieni horizontālajā stāvoklī (II starta fāzes beigās un III fāzes sākumā) sakrīt ar pasaules koordinātu sistēmu (2.13. attēls).
4. Kamanas izvietotas simetriski pret starta platformas ledus pārklājuma centrālo asi un starta rokturiem.
5. Relatīvi pret ledu kamanām ir trīs brīvības pakāpe – virze gar X un Z asīm un rotācija ap Y asi; kamanu savienojumu ar ledu modelē ar plaknes kinemātisko pāri.

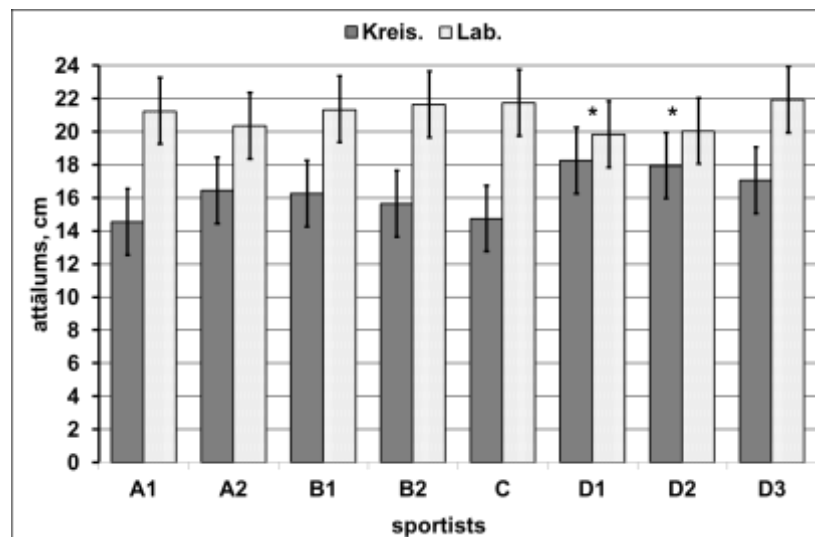
Pieņēmumus par kamanu brīvības pakāpēm un izvietojuma simetriskumu (4. un 5. pieņēmumi) var pārbaudīt pēc sportistu kustību analīzes datiem. 4. pieņēmums apstiprinās, ja attālums Y ass virzienā no ledus pārklājuma centra līdz abām kamanu sliecēm ir vienāds. 3.3. attēls paskaidro mērījumus kamanu izvietojuma simetrijas pārbaudei. Pēc 3.4. attēla redzams, ka sešiem no astoņiem sportistiem attālums no ledus pārklājuma centra līdz labai sliecei ir lielāks, nekā attālums līdz kreisai sliecei, diviem sportistiem atšķirības attālumā ir mērījuma kļūdas robežās (± 2 cm).

Tā kā lielākai sportistu daļai kamanas ir ievērojami nobīdītas pa kreisi no starta platformas centra, tad sākotnējo pieņēmumu par kamanu izvietojuma simetriskumu (4. pieņēmums) nevar uzskatīt par apstiprinātu, un veidojot individuālus starta datormodeļus, jāņem vērā katram sportistam tipiskais kamanu izvietojums un tā ietekmi uz ķermeņa segmentu izvietojumu telpā.

Iepriekšējā apakšnodaļā ir izskatīts jautājums par kamanu kustību X un Z ass virzienā un konstatēts, ka vertikālās kamanu segmenta koordinātes izmaiņas nevar pielīdzināt nullei. Nevienam no pētījuma dalībniekiem II un III starta fāzes izpildes laikā nebija novērota kamanu kustība Y ass virzienā, kas izslēdz nepieciešamību modelēt SL segmenta virzi gar Y asi un rotāciju ap Z asi. Var pieņemt, ka ledus pārklājums ir pietiekoši līdzens, un tādā gadījumā kamanu rotāciju ap X asi arī var izslēgt. Šie apsvērumi atstāj kamanu segmentam trīs brīvības pakāpes XZ plaknē, atbilstoši 5. sākotnējam pieņēmumam – virze gar X un Z asīm un rotācija ap Y asi.



3.3. att. Kamanu un sportista izvietojuma simetriskumu regulējošie attāļumi



3.4. att. 4. pieņēģmuma pārbaude pēc kustību analīzes datiem

Parādīts vidējais attāļums Y ass virzienā no ledus pārklājuma centra līdz ļabai un kreisai sliecei katram sportistam, cm: attāļumi noteikti II starta fāzes sākumā. Ar * atzīmētas vērtības, kuru atšķirības atrodas mērģjuma kļūdas robežās.

Ķermeņa modelis

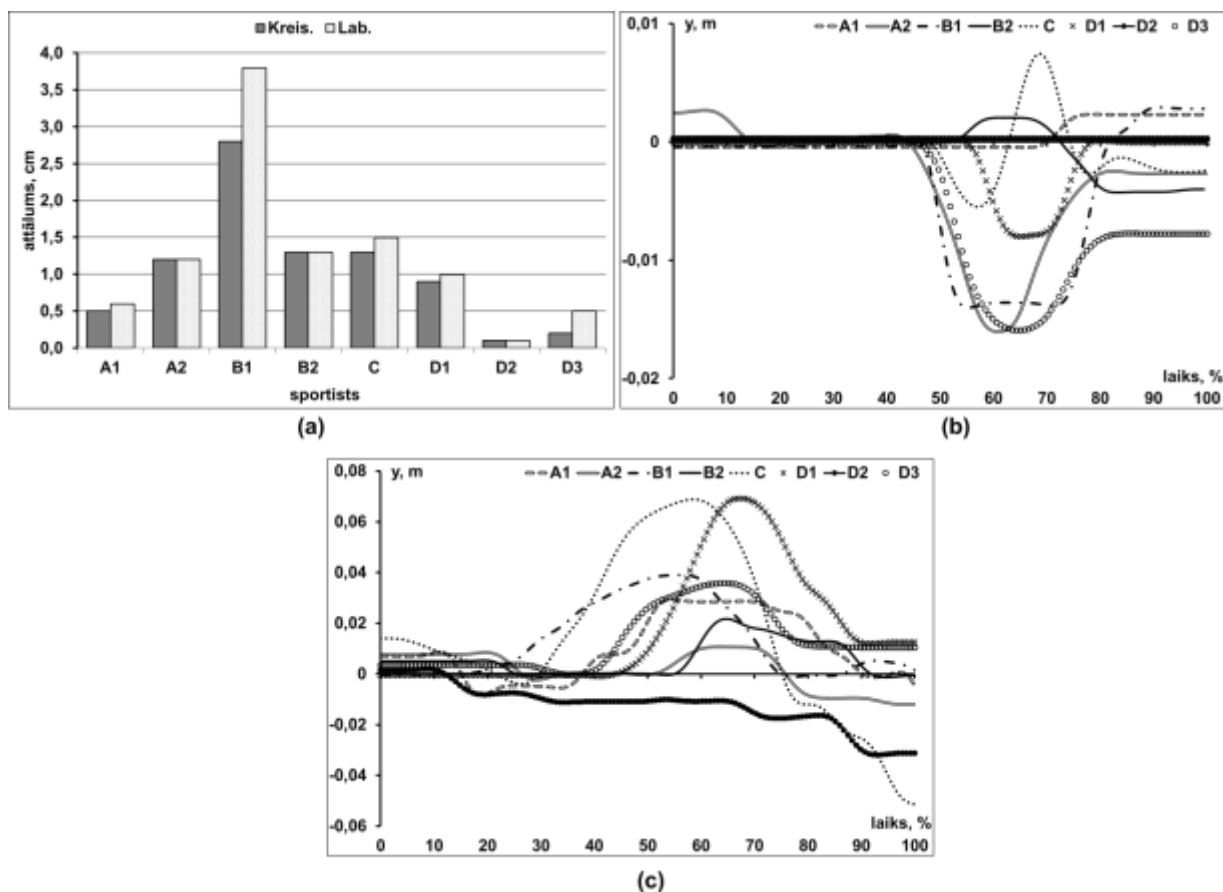
Par sportistu ķermeņa segmentiem ir izdarīti sekojoši sākotnējie pieņēmumi:

6. Sportista ķermenis ir simetrisks un labās un kreisās ķermeņa puses kustības sakrīt.
7. Locītavām ir anatomiskie kustību ierobežojumi (skat. 1.2. nodaļu).
8. Sportists ir izvietots kamanās simetriski pret kamanu garenisko asi.
9. Galvas segmenta kustības netiek izskatīts detalizēti, šis segments ir pievienots modelim estētisko apsvērumu dēļ un ir nekustīgi savienots ar torša segmentu pa vidu starp punktiem RAcr un LAcr – punktā C7.
10. Punkts C7 izvietots simetriski pret RAcr un LAcr un savieno tos nekustīgi.
11. Punkts C7 atrodas vienā taisnē ar punktu Sacr.
12. Punkts Sacr ir izvietots simetriski pret punktiem RCox un LCox un atrodas vienā taisnē ar šiem punktiem, šī taisne ir paralēla Y asij.
13. Punkts Sacr savieno punktus RCox un LCox nekustīgi.
14. Punkti RCox – Sacr – C7 – RAcr – LAcr – LCox veido vienotu ķēdes segmentu.
15. Punktos RCox un LCox torša segments var veikt virzes kustību gar kamanu X_{SL} asi un rotēt ap Y_{SL} asi.
16. Izveidotajā modelī netiek iekļauti plaukstu un pēdu segmenti, to masas pievieno atbilstoši apakšdelmu un apakšstilbu segmentiem.
17. Apakšdelma segmenti tiek pagarināti līdz savienojumam ar starta rokturiem punktos Man.
18. Starta rokturi ir statne, ar kuru apakšdelma segmenti savienojas divkustīgajā kinemātiskajā pāri, atļautās brīvības pakāpes ir rotācija ap pasaules koordinātu sistēmas Y asi un ap apakšdelma segmenta lokālo X_F asi.
19. Punktos Acr augšdelms var rotēt ap augšdelma segmenta lokālajām X_U , Y_U un Z_U asīm.
20. Punktos Cub apakšdelms var rotēt ap augšdelma segmenta lokālo Y_U asi.
21. Punktu Cox locītavas nodrošina augšstilbam trīskustīgo lodes šarnīra savienojumu ar torsu.
22. Punktos Con apakšstilbs var rotēt ap augšstilba segmenta lokālo Y_T asi.
23. Punktos Mal apakšstilbs ir savienots divkustīgajā kinemātiskajā pāri ar segmentu SL attālumā L' no SL segmenta priekšējās daļas, attālums L' ir individuāls katram sportistam.
24. Punktos Mal apakšstilbam ar lodes šarnīra starpniecību nodrošināts trīskustīgs rotācijas savienojums ar segmentu SL.

Kustību analīzē rekonstruētās punkta Cox (un punkta SLb) koordinātes ļauj pārbaudīt 8. un 15. sākotnējos pieņēmumus par sportista izvietojuma simetriskumu un torša segmenta brīvības pakāpēm punktos Cox. 10. pieņēmumu par punktu RAcr un LAcr nekustīgu savienojumu punktā C7 var pārbaudīt pēc punkta Acr y koordinātes.

Tā kā slieces ir izvietotas simetriski pret kamanu centrālo garenisko asi, un sportista ķermenis tiek uzskatīts par simetrisku, tad 8. pieņēmums apstiprinās, ja attālums Y ass virzienā no gūžas punkta Cox līdz tuvākai sliecei ir vienāds labajā un kreisajā pusē (skat. paskaidrojumu 3.3. attēlā). 3.5. attēlā (a) redzami attālumi no punktiem LCox un RCox līdz atbilstošām sliecēm visiem pētījuma dalībniekiem (attālumi noteikti II starta fāzes sākumā). Izņemot sportistu B1 visiem pārējiem sportistiem izmērītie attālumi ir dažu milimetru robežās un gandrīz neatšķiras labajā un kreisajā pusē. Sportistam B1 attālums no gūžas punktiem līdz sliecēm pārsniedz 2,5 cm, taču atšķirība starp labo un kreiso pusi ir mērījuma kļūdas robežās. 3.5. attēls (b) demonstrē punkta LCox y koordinātes vērtības II un III starta fāzes izpildes laikā. Koordinātes ir aprēķinātas relatīvi pret pozīciju rokturu šķērsošanas brīdī II starta fāzē. Redzams, ka gūžas punkta y koordinātes izmaiņas ir mērījuma kļūdas robežās. Tas nozīmē, ka visā II un III starta fāzes izpildes garumā gūžas punkts praktiski nemaina savu izvietojumu gar Y asi, tādēļ 8. pieņēmumu var uzskatīt par patiesu visiem sportistiem un ķermeņa izvietojuma simetriskumu par apstiprinātu.

3.6. attēlā parādīts punkta LCox un SLb horizontālā ātruma (x koordinātes pirmais atvasinājums pēc laika aprēķināts Simi Motion programmatūrā) salīdzinājums visiem sportistiem. Var redzēt, ka šie ātrumi nesakrīt un gūžas punkts pārsvarā „atpaliek” no kamanu kustības. Tas nozīmē, ka sportists un kamanas nekustās kā viens vesels, un gūžas punktos torša segmentam ir iespēja virzīties gar kamanu garenisko asi (X_{SL}). Ņemot vērā sportistu specifisku sēdus pozīciju kamanās, praktiski ir izslēgta gūžas punktu neatkarīgā vertikālā pārvietojuma iespēja – gūžas punkts kustās gar Z asi tikai kopā ar kamanu segmentu. Pareizi izpildītajās starta mēģinājumā ir izslēgta arī rotācijas iespēja ap X asi, bet punkta LCox y koordinātes pārbaude pierāda, ka punktos Cox nepastāv torša rotācija arī ap Z asi. Kopumā šie apsvērumi apstiprina 15. pieņēmumu par torša segmenta brīvības pakāpēm punktos Cox – šajos punktos ir iespējama tikai torša rotācija ap Y (Y_{SL}) asi un virze gar X (X_{SL}) asi.



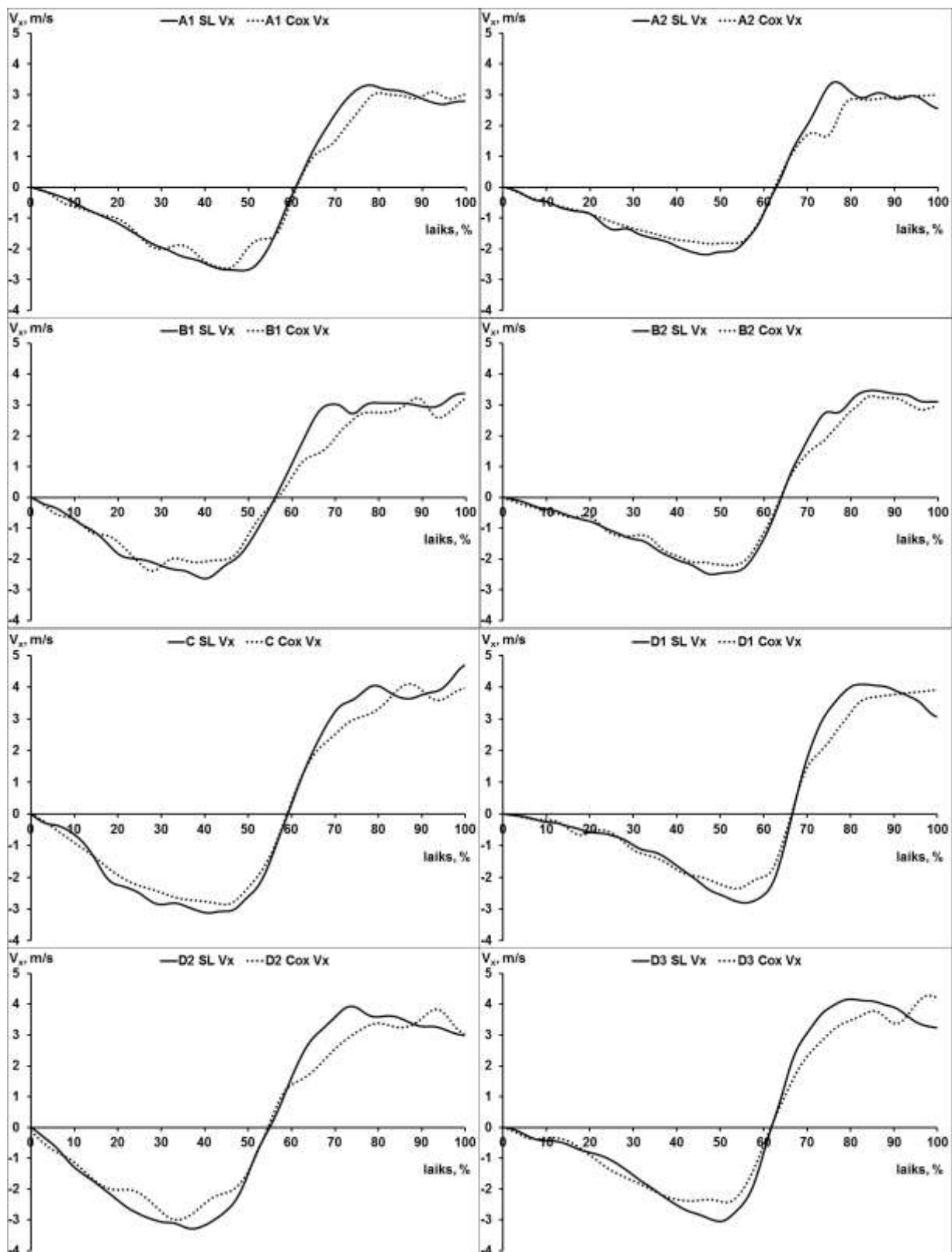
3.5. att. 8., 10., 15. pieņēmumu pārbaude pēc kustību analīzes datiem

(a) vidējais attālums Y ass virzienā no punktiem RCox un LCox līdz atbilstošām sliecēm, cm: attālumi noteikti II starta fāzes sākumā; (b) punkta LCoX y koordinātes laika funkcijas, m; (c) punkta ACr y koordinātes laika funkcijas, m.

Attēlos (b) un (c) koordinātu vērtības uzrādītas relatīvi pret to vērtību starta rokturu šķērsošanas brīdī II starta fāzē; laiks normalizēts pret II un III starta fāzes kopējo ilgumu.

10. pieņēmuma pārbaudes rezultāti parādīti 3.5. attēlā (c). Lielākai sportistu daļai punkta ACr y koordinātes vērtības izmaiņas pārsniedz mērījuma kļūdas robežas, un tas nozīmē, ka no 10. pieņēmuma par nekustīgu punktu LAcR un RAcr savienojumu ir jāatsakās. Jāpieņem, ka punkts C7 savieno divus papildus „plecu” segmentus C7-RAcr un C7-LAcR. Līdz ar to ir jāatsakās arī no 14. sākotnējā pieņēmuma, jo par vienotu segmentu vairs var uzskatīt tikai punktu RCox – Sacr – C7 – LCox savienojumu.

Šajā apakšnodaļā izskatīta to sākotnējo pieņēmumu pārbaude, kas veicama pirms datormodeļa izstrādes, citi pieņēmumi apskatīti atbilstošo modelēšanas etapu ietvaros.



3.6. att. Kamanu un gūžas horizontālā ātruma salīdzinājums II un III starta fāzes izpildes laikā

Laiks normalizēts pret II un III starta fāzes kopējo ilgumu.

3.3.3. Plakanisks modelis

Plakaniskā kinemātiskā ķēde ir vienkāršākais veids, kā modelēt sportista kustības starta platformā. Torsa un kamanu segmenta kustības var būt pietiekoši precīzi modelētas vienā (XZ) plaknē, jo pēc kustību analīzes datiem šo segmentu y koordinātes izmaiņas ir pielīdzināmas nullei (punkti RCox un LCox atbilstoši 12. sākotnējam pieņēmumam ir savienoti nekustīgi ar punktu Sacr, tāpēc punkta Sacr kinemātiskie rādītāji sakrīt ar punkta Cox rādītājiem, izņemot y koordinātes vērtību; punkts C7, atbilstoši daļēji apstiprinātam 14. pieņēmumam, ir savienots ar punktu Sacr vienā segmentā un abu šo punktu y koordinātes vērtības sakrīt).

Tika noskaidrots, ka sportists un kamanas nekustās kā viens vesels, ir reģistrēta punkta Cox relatīva kustība gar kamanu garenisko asi, un tāpēc gūžas punkta horizontālais ātrums nesakrīt ar kamanu ātrumu, kā tas ir parādīts 3.6. attēlā. Lai pirmajā tuvinājumā novērtētu plakaniskā modeļa atbilstību reālajai sistēmai, pieņemsim, ka gūžas neveic virzes kustību relatīvi pret kamanām, un apskatīsim vienkāršotu sportista torsa un kamanu segmenta modeli, kurā kamanu un gūžas kinemātiskie rādītāji sakrīt. Modeļa vienkāršošanai izslēgsim kamanu rotācijas iespēju ap Y asi, atstājot tikai virzes kustības gar X un Z asi, kuras attēlos punkta Cox koordinātes.

Šis un visi turpmākie modeļi izveidoti vienam pētījuma dalībniekam (B2) ar šim sportistam atbilstošiem segmentu garumiem. Kamanu segmenta izmēri ir 1,24 x 0,55 x 0,19 m. Modelis izveidots uz viena veiksmīgi izpildīta starta mēģinājuma piemēra, kuram ir iegūti kustību analīzes dati; II starta fāzes garums šim mēģinājumam ir 1,04 s, II un III fāzes kopējais ilgums ir 1,63 s.

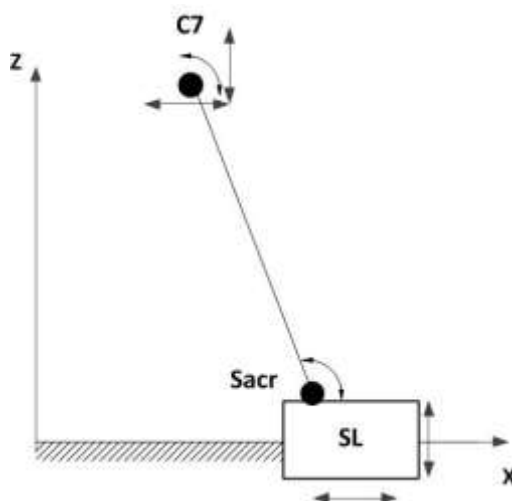
Individuālo masas un inerces parametru aprēķina paātrināšanai pēc de Leva modificētā Zatsiorsky-Seluyanov modeļa [64] izveidotas rēķintabulas Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmonda, WA, ASV) datora programmatūrā. Rēķintabulās iekļauts arī segmentu sākotnējās orientācijas leņķu aprēķins (pagrieziena leņķi ap „pasaules” koordinātu sistēmas X un Y asi – leņķi α un β , atbilstoši) un segmentu masu centra attālums no abiem segmentu ierobežojošiem punktiem. Katra segmenta lokālās koordinātu sistēmas sākumpunkts sakrīt ar šī segmenta masu centru.

Kustību datora imitēšanā izmantoto vispārināto koordinātu vērtības ievietotas šī darba 7. pielikumā, datormodeļu elementu savienošanas shēmas modelēšanas vidē – 8. pielikumā, bet modeļu pārbaudes grafiskie rezultāti – 9. pielikumā.

Torsa un kamanu segmenta vienkāršots plakanisks modelis (modelis A)

Vienkāršots plakanisks modelis sastāv no torsa segmenta, kuru ierobežo punkti C7 un Sacr, kamanu segmenta SL un papildus galvas segmenta, kuru ierobežo punkti Vert un C7. Galvas segments savienots nekustīgi ar torsa segmentu punktā C7. Kamanu segments SL tiek savienots ar torsa segmentu punktā Sacr. Segmentam SL atļautās brīvības pakāpes relatīvi pret ledus pārklājumu (statni) ir virze gar X un Z asi. Torsa segmentam atļautā brīvības pakāpe relatīvi pret segmentu SL ir rotācija ap Y_{SL} asi punktā Sacr. Šī ir atvērtā kinemātiskā ķēde un punktā C7 torsa segmentam ir atļautas visas kustības XZ plaknē. Kinemātiskās ķēdes shēma ir parādīta 3.7. attēlā (galvas segments nav iekļauts).

Šādas ķēdes kustīgums pēc Čebiševa-Grablera-Kutcbaha formulas (1.2.) ir $F = 3$, tātad, lai veiktu kustības imitāciju modelī, ir nepieciešamas trīs vispārināto koordinātu laika funkcijas (un to pirmie divi atvasinājumi pēc laika). Kamanu pārvietojuma attēlošanai lietosim punkta Cox x_{cox} un z_{cox} koordinātes un to atvasinājumus pēc laika ($v_{x_{cox}}$, $a_{x_{cox}}$, $v_{z_{cox}}$ un $a_{z_{cox}}$). Segmenta SL savienojums ar ledu tiek modelēts punktā, kura koordinātes sakrīt ar punktu Sacr. Par trešo vispārināto koordināti kalpo torsa segmenta leņķis ar X asi β_{Tr} . Visu vispārināto koordinātu laika funkcijas var iegūt no kustību analīzes datiem (pirmo un otro atvasinājumu iegūst ievietojot datora modeļa shēmā atvasināšanas blokus, kas redzami modeļa elementu savienošanas shēmā 8. pielikumā; ir iespējams aprēķināt atvasinājumus arī kustību analīzes programmatūrā).



3.7. att. Vienkāršotā plakaniskā modeļa A kinemātiskās ķēdes shēma

Modeļa A sākotnējie dati

	Sacr	C7	Vert	SL	Torss	Galva
x koordināte, m	2,39	2,12	2,01	–	–	–
z koordināte, m	0,19	0,65	0,86	–	–	–
garums, m	–	–	–	1,24	0,53	0,24
Segmenta pagrieziens ap Y asi (nutācijas leņķis)*	–	–	–	0°	-30°	-30°

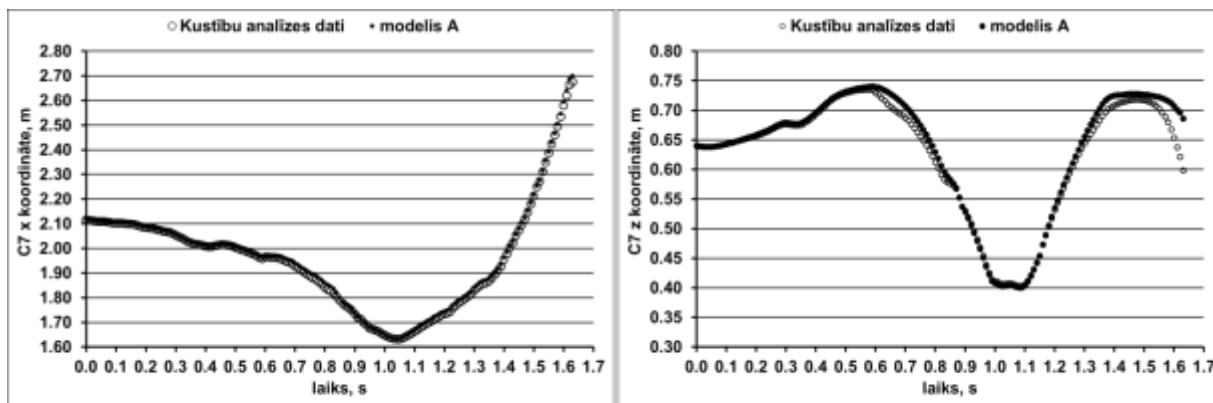
*šeit un tālāk par pozitīvu tiek uzskatīts leņķis pulksteņrādītāja virzienā, ja skatās no koordinātu sākuma punkta koordinātes pieauguma virzienā, par negatīvu – pretējā virzienā

Imitācijas modelim A datora modelēšanas vidē uzdotie segmentu garumi, sākuma pozīcijas un orientācija ievietotas 3.9. tabulā. Plakaniskam modelim segmentu orientāciju references („pasaules”) koordinātu sistēmā nosaka viens leņķis – pagrieziens leņķis ap Y asi. Tādā gadījumā SimMechanics datora modelēšanas vidē segmenta lokālās koordinātu sistēmas orientāciju relatīvi pret „pasaules” koordinātu sistēmu visvienkāršāk uzdot ar Eilera nutācijas leņķi (skat. 3.9. tabulu). Divi modeļa segmentu vizualizēšanas veidi datora modelēšanas vidē (izmantojot izliekto čaulu vizualizēšanas metodi un ekvivalento elipsoīdu metodi) ievietoti 8. pielikumā kopā ar modeļa elementu savienošanas shēmu.

Izveidoto kinemātisko modeli izmanto kustības datora imitēšanai. Lai kustības imitēšanas rezultātā iegūtu interesējošo mainīgo vērtības, modeļa elementu shēmā ievieto speciālus „sensoru” blokus, kas reģistrē nepieciešamos lielumus.

Kustības imitēšana ar modeli A, izmantojot minētās vispārinātās koordinātes, parādīja, ka šis modelis neatspoguļo torša segmenta kustības pilnīgi precīzi (kā references vērtības izmantotas kustību analīzes rezultāti). 3.8 attēlā ar kustību analīzes rezultātiem salīdzinātas modeļa A aprēķinātās punkta C7 x un z koordinātes. Atšķirības no references vērtībām x_{C7} koordinātē nepārsniedz mērījuma kļūdas robežas (± 2 cm), bet atšķirības z_{C7} koordinātes vērtībās ir ievērojami lielākas, sasniedzot līdz pat 10 cm.

Punkta Sacr x un z koordinātēs atšķirības no references vērtībām netika reģistrētas (3.9. attēls).

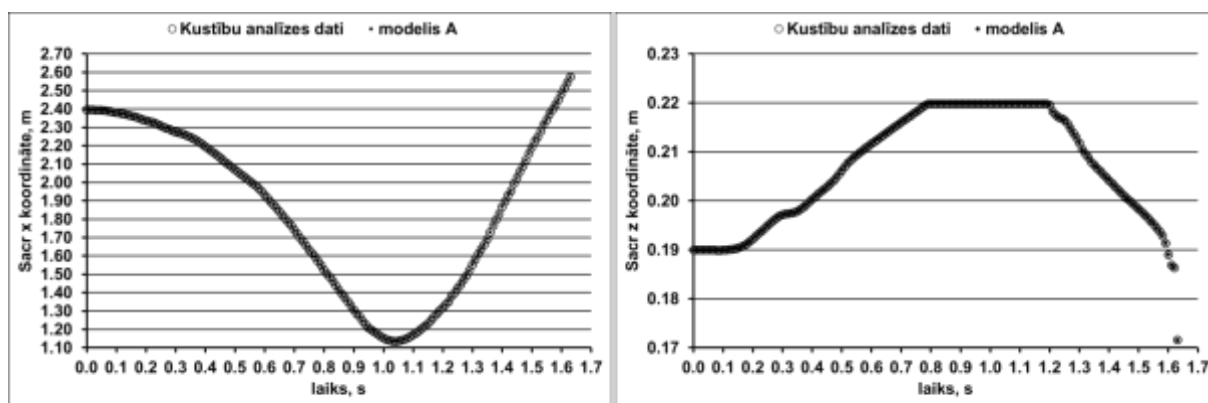


(a)

(b)

3.8. att. Punkta C7 koordinātu vērtības iegūtas kustību analīzē un izmantojot datora modeli A

(a) punkta C7 x koordināte; (b) punkta C7 z koordināte.



(a)

(b)

3.9. att. Punkta Sacr koordinātu vērtības iegūtas kustību analīzē un izmantojot datora modeli A

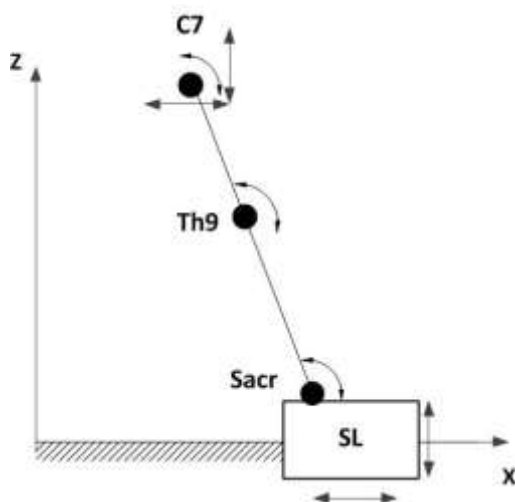
(a) punkta Sacr x koordināte; (b) punkta Sacr z koordināte.

Modelis B

Iepriekšējā apakšnodaļā iegūtie rezultāti liecina par to, ka modelējot torsu ar vienu segmentu (modificēts 14. pieņēmums), nav iespējams panākt pilnīgu modeļa atbilstību kamanīņu braucēja kustībām starta izpildes laikā. Lai uzlabotu modeļa atbilstību reālai fiziskai sistēmai, jāatsakās no pieņēmuma par vienotu torša segmentu un jāmodelē torss vismaz no diviem segmentiem. Pēc de Leva modeļa [64] toršu iedala trīs daļās: augšējā daļā, kuru ierobežo punkti C7 un Th9 (9. krūšu skriemeļa– šķēpveida izauguma līmenī), vidusdaļā un apakšējā daļā, bet Zatsiorsky un kol. darbā [119] ir sniegti masas un inerces parametri ne tikai atsevišķi trim torša daļām, bet arī vidusdaļai un torša apakšējai daļai kopā. Šajā darbā tiek veidots divu segmentu torss: augšējo torša daļu ierobežo punkti C7 un Th9, apakšējo daļu

– punkti Th9 un Sacr. Punkta Th9 izvietojumu torša segmentā nosaka pēc de Leva cilvēka ķermeņa modeļu proporcijām. Tā kā citi dati par torša apakšējo daļu nav pieejami, tad šī segmenta masas un inerces rādītāju noteikšanai ir izmantoti Zatsiorsky un kol. modeļa parametri (3. pielikums). Torša segmentiem atļautā brīvības pakāpe punktā Th9 ir rotācija ap „pasaules” koordinātu sistēmas Y asi.

Salīdzinājumā ar modeli A, modelī B ar divu segmentu toršu ir viens papildus segments un viena papildus locītava ar vienu brīvības pakāpi, un pēc formulas (1.2.) šīs kinemātiskās ķēdes kustīgums jau ir $F = 4$. Kinemātiskās ķēdes shēma redzama 3.10. attēlā. Papildus sākotnējie dati, kas nepieciešami modeļa B izveidei datora modelēšanas vidē, ievietoti 3.10. tabulā.



3.10. att. Modeļa B (divu segmentu torša) kinemātiskās ķēdes shēma

3.10. tabula

Papildus sākotnējie dati modeļa B izveidei

	Th9	Torša augšējā daļa	Torša apakšējā daļa
x koordināte, m	2,22	–	–
z koordināte, m	0,48	–	–
garums, m	–	0,20	0,33
Segmenta pagrieziens ap Y asi (nutācijas leņķis)	–	-30°	-30°

Bez x_{cox} , z_{cox} un β_{Tr} koordinātēm kustības imitēšanai ar modeli B nepieciešama arī ceturrtā vispārinātā koordināte – leņķis starp torsa augšējo un apakšējo daļu (β_{Th9}). Vispārināto koordinātu laika funkcijas, kas nepieciešamas modelim, var iegūt no kustību analīzes datiem. Lineārās koordinātes, līdzīgi kā gūžas koordināti x_{cox} vai z_{cox} , iegūst vienkārši kartējot atbilstošo punktu videoierakstos un aprēķinot šī punkta telpiskās koordinātes.

Atšķirībā no lineārām koordinātēm, leņķisko koordinātu izgūšana no kustību analīzes datiem ir sarežģītāka, jo viena leņķa iegūšanai jākartē divi (ja aprēķina leņķi ar kādu no koordinātu asīm) vai trīs (ja meklē leņķi starp segmentiem) punkti. Piemēram, lai iegūtu leņķa β_{Th9} vērtības, kustību analīzes programmā jākartē trīs punkti: C7, Th9 un Sacr. Datora modelēšanas vidē leņķisko koordinātu pielietošana segmentu savienojumu (locītavu) kustības imitēšanai arī ir sarežģītāka, nekā lineāro koordinātu izmantošana: datora modelēšanas vidē kustības imitēšana notiek relatīvi pret sākotnējo modeļa pozīciju un orientāciju, tādēļ kustību analīzē iegūtās koordinātes ir jāizsaka relatīvās vērtībās pret atbilstošā punkta sākotnējo koordināti „pasaules” koordinātu sistēmā.

Lineārām koordinātēm to var izteikt ar formulu:

$$x_{mod}(t) = x_{KA}(t) - x_{KA}(ini),$$

kur $x_{mod}(t)$ – modelī ievietojamā lineārā koordināte laika momentā t ;

$x_{KA}(t)$ – kustību analīzē iegūtā lineārā koordināte laika momentā t ;

$x_{KA}(ini)$ – kustību analīzē iegūtā lineārā koordināte laika momentā $t = 0$.

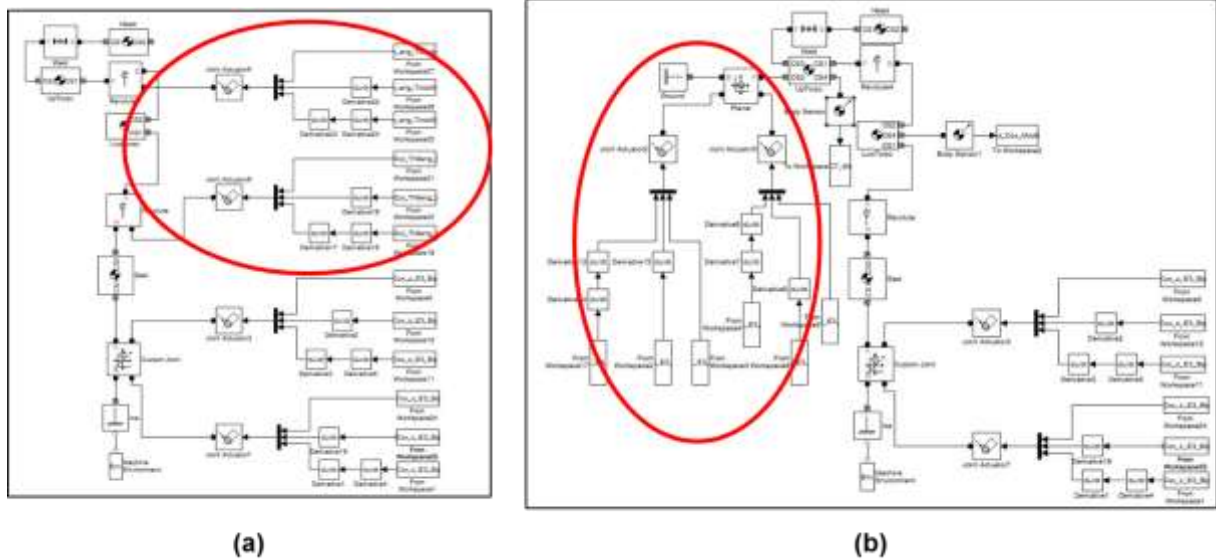
Leņķisko koordinātu gadījumā modelēšanas vidē tās ir jāizsaka relatīvi pret segmenta sākotnējo orientāciju, bet vienā no divu savā starpā savienoto segmentu lokālajā koordinātu sistēmā, nevis „pasaules” koordinātu sistēmā. Savukārt kustību analīzes sistēma veic leņķu aprēķinu „pasaules” koordinātu sistēmā. Jāņem vērā arī tas, ka SimMechanics datora modelēšanas vidē tiek izskatīti tikai plakaniskie pagriezienu leņķi ap izvēlētajām koordinātu sistēmas trīs perpendikulārām asīm; telpiskie leņķi tiek iegūti kombinējot plakaniskos pagriezienus. Leņķu interpretācija ir no 0 līdz +180° pulksteņrādītāja virzienā un no 0 līdz –180° pretējā virzienā, ja skatās atbilstošās koordinātes pieauguma virzienā. Turpretī kustību analīzes programmatūra aprēķina telpiskos leņķus; plāknē tiek aprēķināti tikai leņķi ar koordinātu asīm.

Pāreja no vienas leņķu interpretācijas sistēmas uz otru prasa papildus aprēķinus, kas var būt laika ietilpīgi, it īpaši modelējot telpisku sistēmu. Ņemot vērā šos apsvērumus, ir lietderīgi izskatīt iespējas samazināt kustību imitēšanai izmantojamo leņķisko vispārināto koordinātu

skaitu. Lai izvairītos no nepieciešamības iegūt kustību analīzes programmatūrā leņķiskās koordinātes un veikt šo koordinātu tālāku interpretāciju, ir iespējams ieviest izmaiņas pašā imitācijas modeļa shēmā datora modelēšanas vidē un panākt, ka par „dzenošām” koordinātēm kalpo tikai kustību analīzē iegūtās lineārās koordinātes.

Modelis B1

Gadījumā ar modeli B – vienkāršotu divu segmentu torša un kamanu modeli – no leņķiskām vispārinātām koordinātēm atbrīvojas sekojoši. Atvērto kinemātisko ķēdi pārvērš par noslēgtu, savienojot brīvo segmenta galu (šajā gadījumā torša punktu C7, jo galvas segments netiek ņemts vērā) ar iedomājamu „statni” trīskustīgajā (plaknes) kinemātiskajā pāri caur „bezsvara locītavu” (apzīmēsim tādā veidā iegūto jauno modeli kā modeli B1). Iedomājamās „statnes” koordināte sakrīt ar C7 koordināti laika momentā $t = 0$. Plaknes kinemātiskais pāris punktā C7 nodrošina torša augšējās daļas segmentam iespēju veikt virzes kustību gar „pasaules” koordinātu sistēmas X un Z asīm un rotēt ap Y asi, kas pilnībā atbilst brīvā segmenta gala kustību iespējām modelī B. Līdzīgi kā modelim B, arī modificēta modeļa B1 kustīgums ir vienāds ar 4, bet šajā gadījumā „dzenošos” locekļus modeļa shēmā var pievienot punktam C7. Tad par trešo un ceturto vispārināto koordināti var kalpot punkta C7 lineārās x_{C7} un z_{C7} koordinātes, un nav nepieciešams izmantot leņķiskās vispārinātās koordinātes. 3.11. attēlā ir salīdzinātas modeļu B un B1 elementu savienošanas shēmas datora modelēšanas vidē. Redzams, ka modeļa B1 shēmā (attēls (b)) parādījušies papildus elementi – vēl viena statne un locītava. Modeļa vizualizēšanā šie papildus elementi neatspoguļojas – modeļu B un B1 vizualizēšanas ir identiskas (ievietotas 8. pielikumā kopā ar elementu savienošanas shēmām). Kinemātiskās ķēdes noslēgšana un punkta C7 koordinātu izmantošana kustības imitēšanai datora modelēšanas vidē atbrīvo no nepieciešamības kartēt Simi Motion programmatūrā vienu papildus sportista ķermeņa punktu – punktu Th9. Kartējamo punktu skaita samazināšana paātrina analīzes rezultātu iegūšanu, kas ir svarīgi darbā ar sportistiem, it īpaši mācību – treniņu nometņu laikā.



3.11. att. Leņķisko vispārināto koordinātu aizstāšana ar lineārām divu segmentu torša modeli

(a) modelis B, iezīmēti „dzenošie locekļi” ar leņķiskām koordinātēm; (b) modelis B1, iezīmēts savienojums ar „iedomājamo statni” un „dzenošie locekļi” ar lineārām koordinātēm.

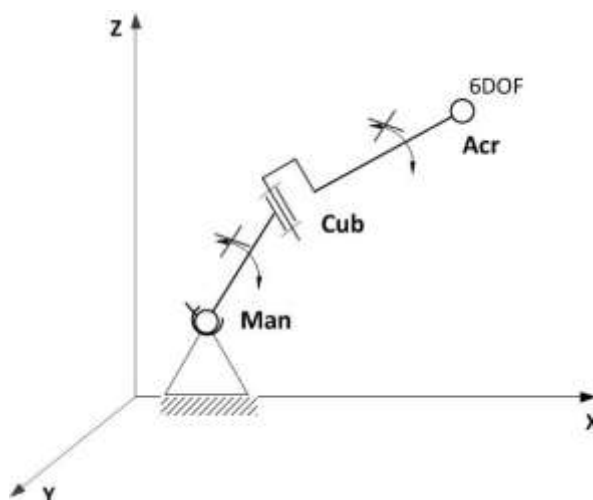
Veicot kustības imitēšanu ar modeli B1 un izvēlētām vispārinātām koordinātēm, iegūstam punktu C7 un Sacr (saprīt ar x_{Cox} un z_{Cox}) koordinātes identiskas iegūtām ar kustību analīzes metodi. Koordinātu salīdzinājuma rezultāti ievietoti 9. pielikumā. Pārbaudes nolūkos tika novērtētas arī punkta Th9 koordinātes – salīdzinātas to vērtības iegūtas no augšējā un apakšējā torša segmentiem modelī B1. Abu segmentu punkta Th9 koordinātes sakrīt, norādot, ka savienojums starp torša segmenta daļām netiek pārrauts. Kustības imitēšana izmantojot modeli B1 parādīja, ka šāds modelis var pilnīgi adekvāti atspoguļot reālās fiziskās sistēmas kustības un šo modeli var uzskatīt par pieņemamu torša un kamanu segmenta kustības atspoguļošanai II un III starta fāzes izpildes laikā, ja neņem vērā atšķirības kamanu un gūžas punkta kinemātikā.

3.3.4. Telpisks rokas modelis

Kamaniņu starta sākotnējo fāžu izpildes laikā sportista rokas un kājas kustās vienlaicīgi vairākās plaknēs, un rokas modelis var būt pietiekoši precīzs tikai ja tas ir veidots telpiski. Rokas modeļa kustības imitēšanai izmantosim to pašu metodi, kas lietota modeļa B1 veidošanā: lai izvairītos no leņķisko vispārināto koordinātu pielietošanas, katru rokas segmentu distālā punktā, skaitot no starta roktura, savienosim ar iedomājamo „statni” tādā kinemātiskā pāri, kas atstāj segmentam visas 6 brīvības pakāpes.

Divu segmentu rokas modelis

Ievērojot sākotnējos 16. un 17. pieņēmumus veidosim rokas modeli, kas sastāv no diviem segmentiem – augšdelma un apakšdelma. Apakšdelma segmentu ierobežo punkti Man un Cub, atļautās brīvības pakāpes atbilst 18. un 20. pieņēmumiem (ir izslēgta segmenta rotācija ap tā garenisko asi), punkta Man koordinātes sakrīt ar starta roktura koordinātēm. Papildus punkts Cub ir savienots ar iedomājumu „statni” ar sešu brīvības pakāpju „locītavu”. Augšdelma segmentu ierobežo punkti Cub un Acr, punkts Acr noslēdz rokas kinemātisko ķēdi, savienojoties ar iedomājamu „statni” arī ar sešu brīvības pakāpju „locītavu”. Tādā gadījumā kinemātiskās ķēdes shēma (3.12. attēls, punkta Cub savienojums ar „statni” nav parādīts) neatšķirsies no atvērtās ķēdes, bet elementu savienošanas shēmā datora modelēšanas vidē būs papildus divas locītavas un statnes (8. pielikums).



3.12. att. Divu segmentu rokas modeļa kinemātiskās ķēdes shēma

Segmenta lokālās koordinātu sistēmas orientācijas noteikšanai telpā nepieciešami vismaz divi leņķi. Eilera leņķu noteikšana no kustību analīzes datiem ir apgrūtināta, jo pagrieziena leņķi tiek iegūti „pasaules” koordinātu sistēmā. Nosakot telpisku modeļu segmentu orientāciju priekšroka ir kvaternionu izmantošanai, jo tie ļauj kombinēt „pasaules” koordinātu sistēmā noteiktos pagriezienus, bet salīdzinājumā ar pagrieziena matricām matemātiskās operācijas ar kvaternioniem ir vienkāršākas. [122] SimMechanics datora modelēšanas vidē segmentu lokālo koordinātu sistēmu orientāciju uzdod ar vienu rezultējošo kvaternionu, ko iegūst savā starpā reizinot segmenta pirmo un otro pagriezienu aprakstošus kvaternionus.

Šajā darbā izmantosim kvaternionu ar vienības vektoru (1 0 0) pirmajam pagriezienam un ar vienības vektoru (0 1 0) – otram. Plakniskie pagriezienu leņķi no kustību analīzes datiem tiek noteikti kā segmenta lokālās vertikālās ass Z_{Segm} projekcijas leņķis ar „pasaules” Z asi YZ un XZ plaknē atbilstoši. Divu segmentu rokas modeļa sākotnējie dati (punktu koordinātes, segmentu garumi un orientācija) ievietoti 3.11. tabulā, vizualizēšanas datora modelēšanas vidē ievietotas 8. pielikumā kopā ar elementu savienošanas shēmu.

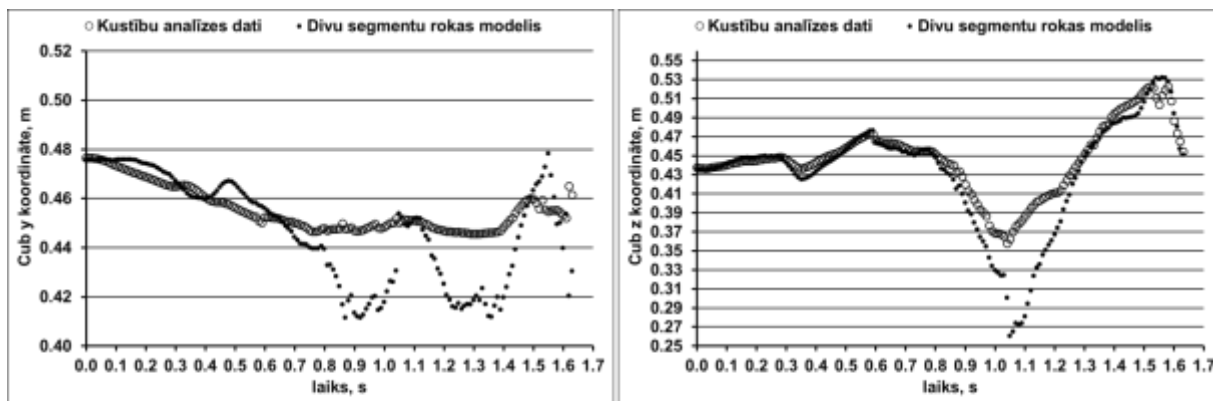
3.11. tabula

Divu segmentu rokas modeļa sākotnējie dati

	Man*	Cub	Acr	Augšdelms	Apakšdelms
x koordināte, m	2,19	1,98	2,12	–	–
y koordināte, m	0,38	0,48	0,59	–	–
z koordināte, m	0,25	0,44	0,64	–	–
garums, m	–	–	–	0,27	0,30
Z_{Segm} projekcijas leņķis ar Z YZ plaknē	–	–	–	-24°	-19°
Z_{Segm} projekcijas leņķis ar Z XZ plaknē	–	–	–	36°	-47°

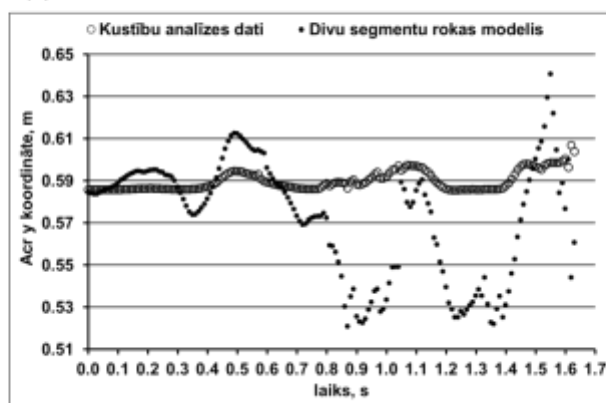
*koordinātes sakrīt ar starta roktura koordinātēm

Telpiskas kinemātiskās ķēdes kustīgumu nosaka pēc (1.1.) formulas, divu segmentu rokas modeļa kustīgums ir $F = 3$. Lai bez papildus ierobežojošiem elementiem panāktu, ka rokas modeļa kustības ievēro anatomiskos ierobežojumus, kā vispārinātās koordinātes kustības imitēšanai ir piemērotas punkta Acr x_{Acr} un z_{Acr} un punkta Cub x_{Cub} koordinātes. Ir iespējams imitēt kustību arī izmantojot tikai punkta Acr koordinātes – tādā gadījumā nav nepieciešams veidot papildus elementus punkta Cub kustībai, taču ir nepieciešami papildus elementi elkoņa locītavas leņķa ierobežošanai, lai tas nepārsniegtu anatomiski iespējamās vērtības. Tā kā leņķa vērtību ierobežošana modelī ir sarežģītāka, nekā punkta savienošana ar „statni”, tad šajā modelī kustības imitēšanai ir lietderīgāk izmantot minētās abu divu punktu koordinātes. Kustības imitēšana izmantojot punktu Acr un Cub koordinātes parādīja, ka divu segmentu modelis neatpoguļo rokas kinemātiku pilnīgi precīzi (3.13. attēls).



(a)

(b)



(c)

3.13. att. Punkta Cub y un z un punkta Acr y koordinātu vērtības iegūtas kustību analīzē un izmantojot divu segmentu rokas datora modeli

(a) punkta Cub y koordināte; (b) punkta Cub z koordināte; (c) punkta Acr y koordināte.

Visās trīs koordinātēs, kas netika izmantotas modeļa kustināšanai, atšķirības starp kustību analīzes un kustības modelēšanas rezultātiem ievērojami pārsniedz mērījuma kļūdu – divsegmentu rokas modelī koordinātu izmaiņu amplitūda ir lielāka, nekā pēc references datiem. Pārējo trīs koordinātu laika funkcijas sakrīt vai gandrīz sakrīt ar kustību analīzes rezultātiem, kā parādīts 9. pielikumā. Iegūtie rezultāti demonstrē, ka divu segmentu modeli nevar uzskatīt par piemērotu rokas kinemātikas modelēšanai. Lai uzlabotu modeļa precizitāti un tuvinātu rezultātus references datiem, ir jāmodificē sākotnējie 16., 17., un 18. pieņēmumi un jāpievieno rokas modelim trūkstošais trešais segments – plauksta.

Rokas modelis ar plaukostas segmentu

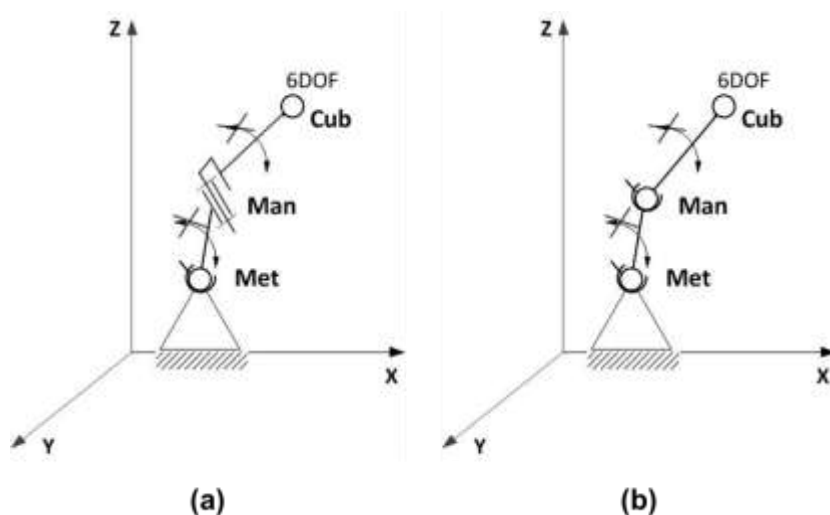
Rokas modelis ar plaukostas segmentu tiek papildināts ar vienu locītavu – plaukostas locītavu, kas savieno apakšdelma un plaukostas segmentu punktā Man. Apakšdelma segments vairs netiek mākslīgi pagarināts un punkta Man izvietojums atbilst kustību analīzes datiem. Plaukostas segmentu ierobežo punkti Man un Met, savienojums ar starta rokturi tiek modelēts punktā Met. Šajā punktā atļautās brīvības pakāpes paliek tādas pašas, kā iepriekšējā modeļa savienošanas punktā ar starta rokturi – rotācija ap „pasaules” koordinātu sistēmas Y asi un ap plaukostas segmenta lokālo X_H asi. Plaukostas locītavā, savukārt, ir iespējams izveidot vienkustīgu (rotācija ap apakšdelma segmenta lokālo Y_F asi) vai divkustīgu (rotācija ap apakšdelma segmenta lokālām X_F un Y_F asīm) savienojumu. Lai pārbaudītu, kāds savienojuma veids ir optimāls kamaniņu starta rāviens kustības modelēšanai, konstruēsim divus modeļus rocai līdz elkonim. Abos modeļos tiek iekļauti divi segmenti – apakšdelms un plauksta: modelis C paredz, ka šie segmenti ir savienoti vienkustīgajā kinemātiskajā pāri, bet modelī C1 šie segmenti tiek savienoti divkustīgajā pāri (3.14. attēls). Modeļu C un C1 vizualizēšanas ir identiskas (ievietotas 8. pielikumā kopā ar elementu savienošanas shēmām).

Pēc de Leva modeļa (3. pielikums) plauksta tiek izskatīta līdz III delnas kaula proksimālam galam, kas ir apmierinoši, modelējot II un III starta fāzi kamaniņu sportā, jo šajās fāzēs sportista pirksti ir saliekti rokturu satveršanai un punkta Met koordinātes pietiekoši labi atbilst starta rokturu koordinātēm. Segmenta masa netiek mainīta salīdzinājumā ar pilnu plaukostas garumu. Apakšdelma un plaukostas modeļa izveidei nepieciešamie sākotnējie dati ievietoti 3.12. tabulā.

Atbilstoši iepriekš aprakstītai metodikai, lai izvairītos no leņķisko vispārināto koordinātu izmantošanas, punkti Cub un Man tiek savienots ar iedomājamu „statni”. Līdzīgi kā gadījumā ar divu segmentu rokas modeli, kustības imitēšanai ar modeli C, kura kustīgums pēc (1.1.) formulas ir $F = 3$, nepieciešamas divas punkta Cub un viena punkta Man lineārās koordinātes. Pārbaudes rezultāti parādīja, ka vispiemērotākās ir koordinātes x_{Cub} , y_{Cub} un x_{Man} . Iespējams izmantot arī tikai punkta Cub koordinātes, bet būs nepieciešami papildus elementi shēmā, lai nodrošinātu adekvātu leņķi plaukostas locītavā. Modeļa C1 kustīgums ir $F = 4$, un kustības imitēšanai ar šo modeli vispiemērotākās ir y_{Cub} , z_{Cub} un x_{Man} , y_{Man} koordinātes.

Salīdzinot koordinātu laika funkcijas iegūtas izmantojot divus apakšdelma-plaukostas modeļus ar references datiem, redzams, ka abi plaukostas locītavas modelēšanas varianti pietiekoši labi prognozē apskatāmo punktu kinemātiku (9. pielikums). Modeļa C sniegtais punkta Cox z un punkta Man y koordinātes laika funkcijas aprēķins nav tik precīzs, kā

aprēķins ar modeli C1 (3.15. attēls), bet neprecizitātes aprēķinā nepārsniedz mērījuma kļūdu. Pēc iegūtiem rezultātiem var secināt, ka abi modeļi ir piemēroti kamaniņu starta rāvienu datora imitēšanai, bet modeļa C1 izmantošana šķietami ļauj panākt lielāku precizitāti.



3.14. att. Apakšdelma un plaukstas modeļa kinemātiskās ķēdes

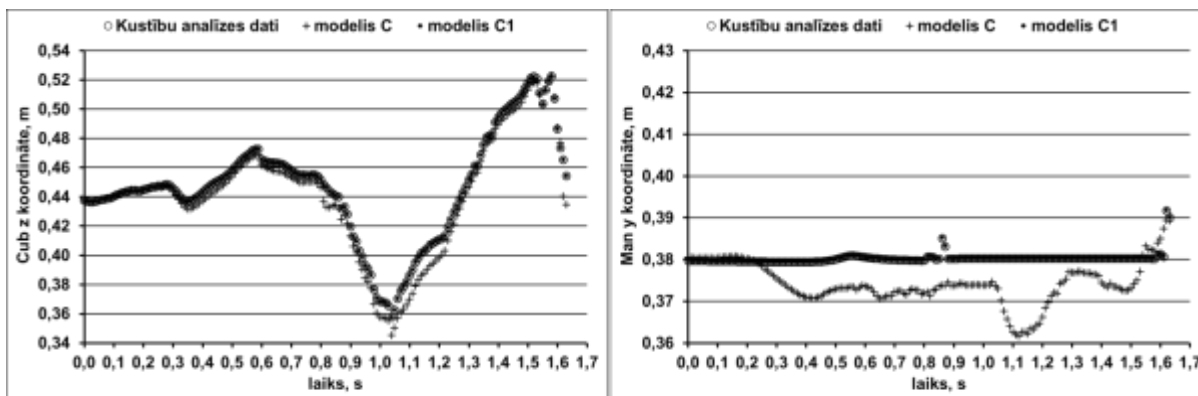
(a) modelis C; (b) modelis C1.

3.12. tabula

Papildus sākotnējie dati apakšdelma-plaukstas modeļa izveidei

	Met*	Man	Cub	Apakšdelms	Plauksta
x koordināte, m	2,19	2,12	1,98	—	—
y koordināte, m	0,39	0,37	0,48	—	—
z koordināte, m	0,25	0,28	0,44	—	—
garums, m	—	—	—	0,23	0,07
Z _{Segm} projekcijas leņķis ar Z YZ plaknē	—	—	—	-24°	4°
Z _{Segm} projekcijas leņķis ar Z XZ plaknē	—	—	—	-40°	-68°

*koordinātes sakrīt ar starta roktura koordinātēm

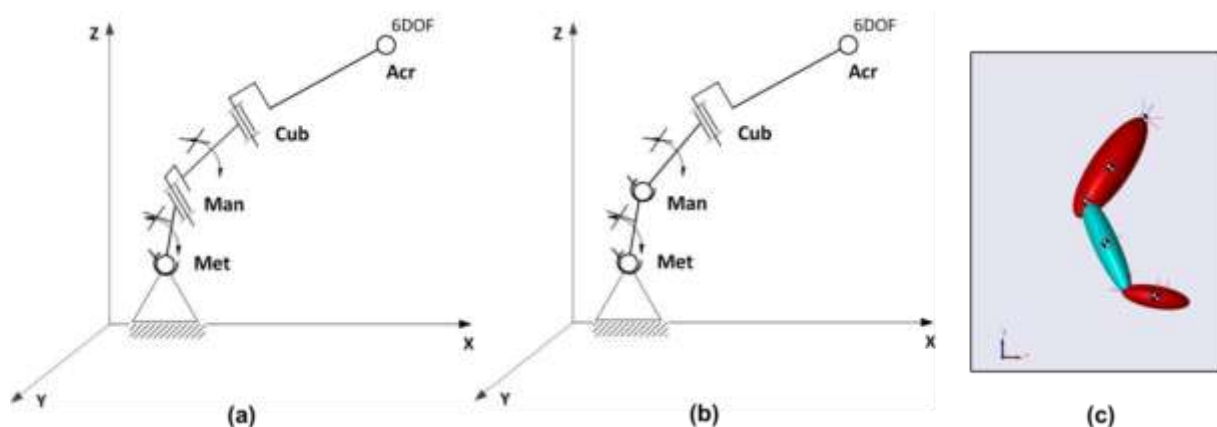


3.15. att. Apakšdelma un plaukstas modeļu C un C1 rezultātu salīdzinājums ar kustību analīzes datiem

(a) punkta Cub z koordināte; (b) punkta Man y koordināte.

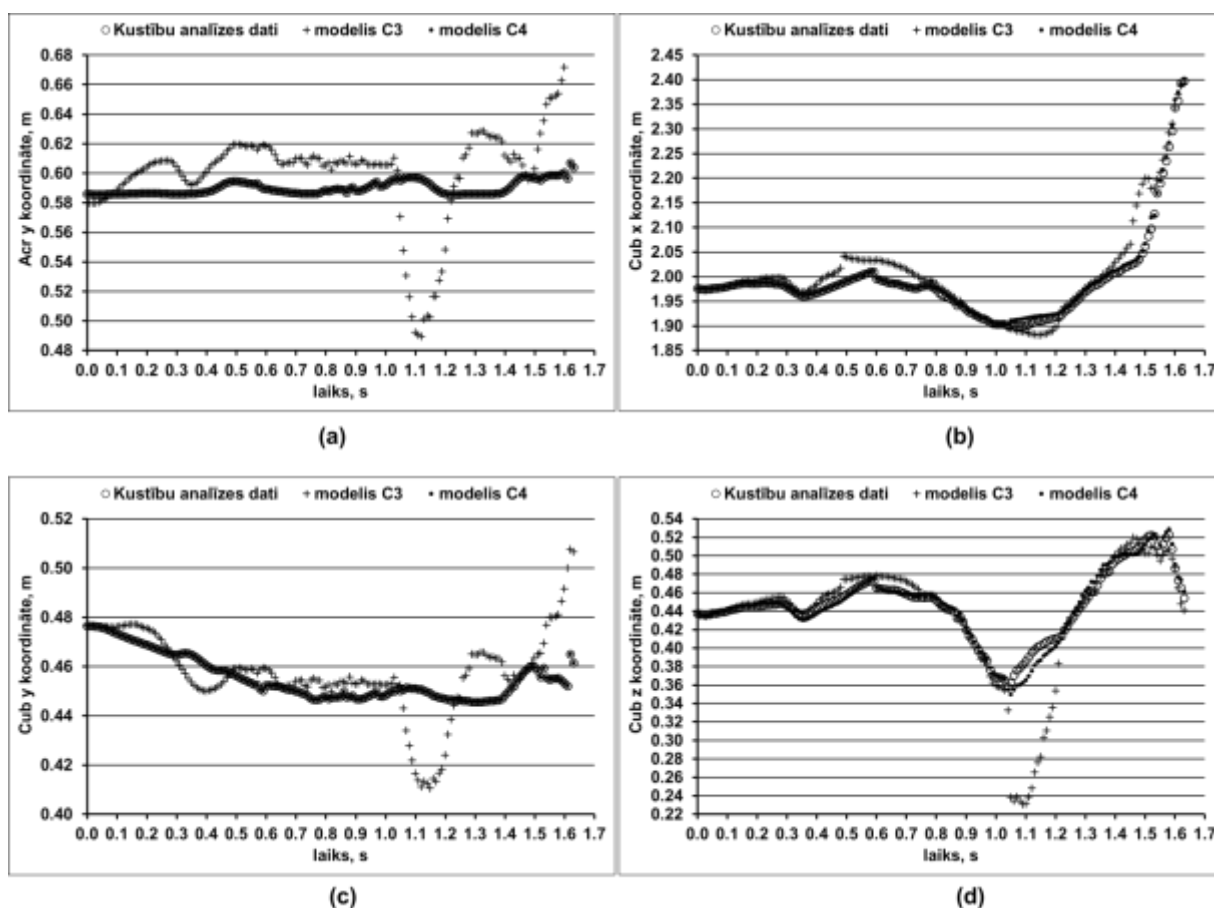
Trīs segmentu rokas modelis

Lai pārliecinātos, vai abi modeļi – C un C1 – vienādi ir piemēroti kamaniņu starta rāvienu modelēšanai, savienosim tos ar augšdelma segmentu. Augšdelma un apakšdelma savienojums ir tāds pats, kā divu segmentu rokas modelī – ar vienu rotācijas brīvības pakāpi. Vienkāršībai apzīmēsim C modeļa un augšdelma kombināciju par modeli C3, bet augšdelma kombināciju ar C1 modeli – par modeli C4 (3.16. attēls). Abos jaunajos modeļos ar iedomājamu „statni” ir savienots tikai punkts A_{cr} , un šī punkta kustības imitēšanai, līdzīgi kā divu segmentu rokas modelī, izmantojamas x_{Acr} un z_{Acr} koordinātes. Modeļi C un C1 sniedz informāciju par apakšdelma un plaukstas segmentu orientācijas leņķu (α_F , β_F , α_H un β_H) laika funkcijām lokālajās koordinātu sistēmās. Šādi iegūtie leņķi var būt uzreiz ievietoti citos modeļos, lai veiktu kustības imitēšanu, jo vairs nav nepieciešamas izmaiņas leņķu interpretācijā. Tāpēc trīs segmentu rokas modeļos ar „statni” savienosim tikai punktu A_{cr} , bet pārējo brīvības pakāpju kustīnāšanai izmantosim leņķiskās koordinātes no apakšdelma-plaukstas modeļiem. Modelim C3 bez koordinātēm x_{Acr} un z_{Acr} nepieciešamas vēl divas vispārinātās koordinātes (piemērotākās ir ar modeļa C palīdzību iegūtās plaukstas segmenta orientācijas leņķi plaukstas koordinātu sistēmā: α_{H1} un β_{H1}), bet modelim C4 – trīs (modeļa C1 sniegtās plaukstas leņķi α_{H2} un β_{H2} un apakšdelma pagriezienu leņķis ap šī segmenta lokālo Y_F asi β_{F2}).



3.16. att. Trīs segmentu rokas modelis

(a) modeļa C3 kinemātiskās ķēdes shēma; (b) modeļa C4 kinemātiskās ķēdes shēma; (c) vizualizēšana ar ekvivalentajiem elipsoīdiem datora modelēšanas vidē.



3.17. att. Trīs segmentu rokas modeļu C3 un C4 rezultātu salīdzinājums ar kustību analīzes datiem

- (a) punkta Acr y koordināte; (b) punkta Cub x koordināte; (c) punkta Cub y koordināte; (d) punkta Cub z koordināte.

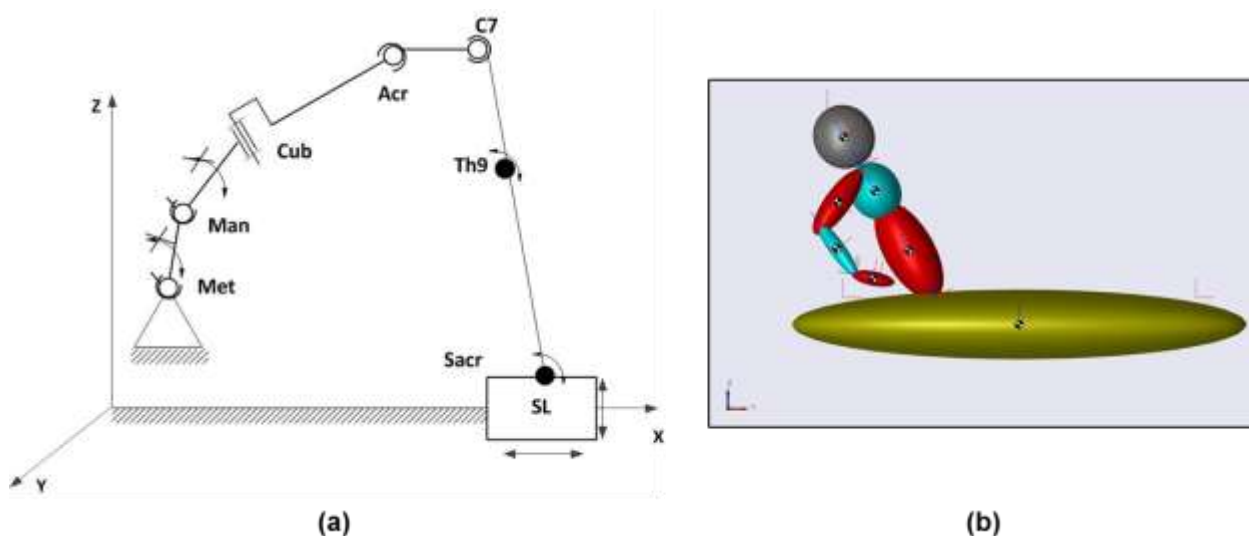
Kustību imitēšana ar modeļiem C3 un C4 parādīja, ka tikai modelis C4 pietiekoši precīzi attēlo rokas kinemātiku II un III starta fāzes izpildes laikā. 3.17. attēlā redzams, ka modelis C3 neļauj realizēt punktu Acr un Cub kustības saskaņā ar kustību analīzē iegūtajiem datiem – lielākās atšķirības ir novērojamas punkta Acr y koordinātē un punkta Cub z koordinātē. Ņemot vērā šos rezultātus, par piemērotu kamaniņu starta sākotnējo fāžu imitēšanai var būt atzīts tikai divkustīgs plaukstas locītavas modelis, kas tiks izmantots turpmāk pilna ķermeņa modeļa izveidē.

3.3.5. Ķermeņa modelis

Vienkāršots viensusējs modelis

Iepriekš tika izskatīti atsevišķi izveidoti torša un rokas modeļi. Veiktās pārbaudēs tika noteikti vispiemērotākie rokas un torša modeļi, kas pietiekoši precīzi imitē reālās fiziskās sistēmas kinemātiku. Vienkāršotu viensusēju ķermeņa augšējās daļas datora modeli var iegūt savienojot kopā izvēlētos modeļus – divu segmentu torša modeli B1 un trīs segmentu rokas modeli C4. Šie modeļi savā starpā savienojas „pleca” segmentā (C7-Acr), kuru datora modelēšanas vidē var imitēt divējādi: izmantojot „bezsvara savienotāju”, kas pieejams no modelēšanas programmatūras iebūvēto savienošanas elementu kataloga, vai izveidojot papildus segmentu ar tuviem nullei masas un inerces rādītājiem. Tā kā de Leva un Zatsiorsky un kol. cilvēka ķermeņa modeļi neparedz atsevišķus „pleca” segmentus un torša augšējā daļa šajos modeļos netiek papildus dalīta [64, 118], tad par labāku variantu ir atzīstams „bezsvara savienotājs”, jo tas neievieš papildus modifikācijas pamata ķermeņa modelī. „Bezsvara savienotājs” sastāv no divām lodes šarnīra locītavām, savienotām savā starpā ar nemainīga garuma bezsvara stieni. Šāds savienojuma veids atbilst 19. sākotnējam pieņēmumam par iespējamām augšdelma rotācijas kustībām. Viensusēja ķermeņa augšējās daļas modeļa (modelis D1) kinemātiskā shēma un vizualizēšana datora modelēšanas vidē parādīta 3.18. attēlā. „Bezsvara savienotāji” modeļu vizualizēšanās neattēlojas.

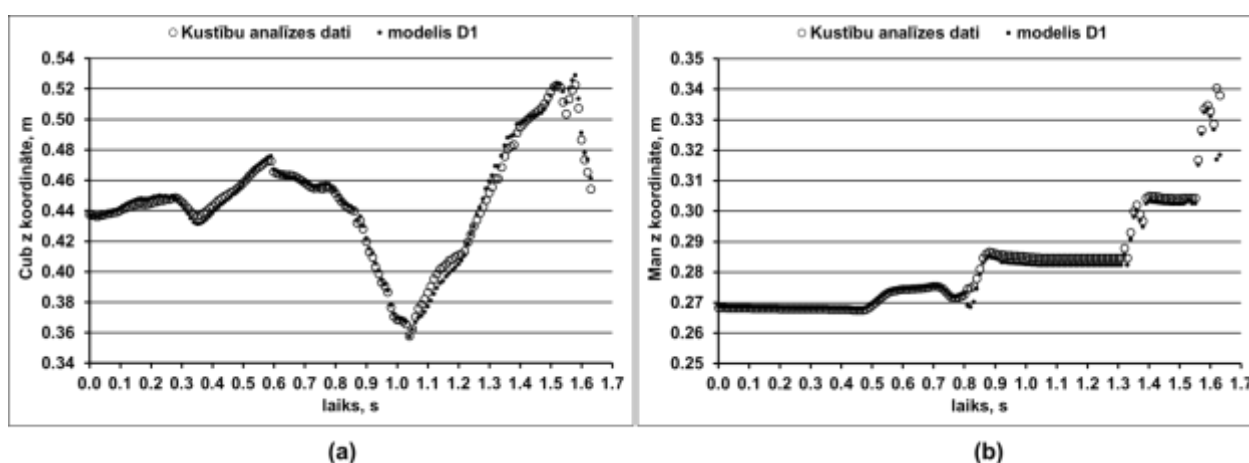
Kustības imitēšanai ar izveidoto ķermeņa augšējās daļas viensusēju modeli ir nepieciešamas astoņas vispārinātās koordinātes (torša un rokas modeļa savienošana izslēdz šo segmentu neatkarīgus pārvietojumus). Tā kā no iepriekš izstrādātajiem modeļiem ir iespējams iegūt leņķiskās koordinātes tādā veidā, kas atbilst datora modelēšanas vides prasībām, tad kustības imitēšanai ar modeli D1 tiek izmantotas sešas leņķiskās un tikai divas lineārās koordinātes – punkta Cox x un z koordinātes.



3.18. att. Modelis D1 – torša augšējās daļas modelis

(a) kinemātiskās ķēdes shēma; (b) vizualizēšana ar ekvivalentajiem elipsoīdiem datora modelēšanas vidē.

No kustības imitēšanas ar modeli B1 tiek iegūtas divas leņķiskās koordinātes, kas nepieciešamas torša daļas kinemātikas atspoguļošanai – leņķis starp torša augšējo un apakšējo daļu β_{Th9} un torša apakšējās daļas pagrieziens leņķis ap Y asi β_{LT} . Jau ir aprakstītas trīs leņķiskās koordinātes, iegūtas no apakšdelma un plaukstas modeļa C1 – α_{H2} , β_{H2} un β_{F2} . Pēdējo nepieciešamo leņķisko koordināti iegūst no kustības imitēšanas ar modeli C4 – tas ir leņķis elkoņa locītavā δ_{Elb} .



3.19. att. Torša augšējās daļas modeļa D1 rezultātu salīdzinājums ar kustību analīzes datiem

(a) punkta Cub z koordināte; (b) punkta Man z koordināte.

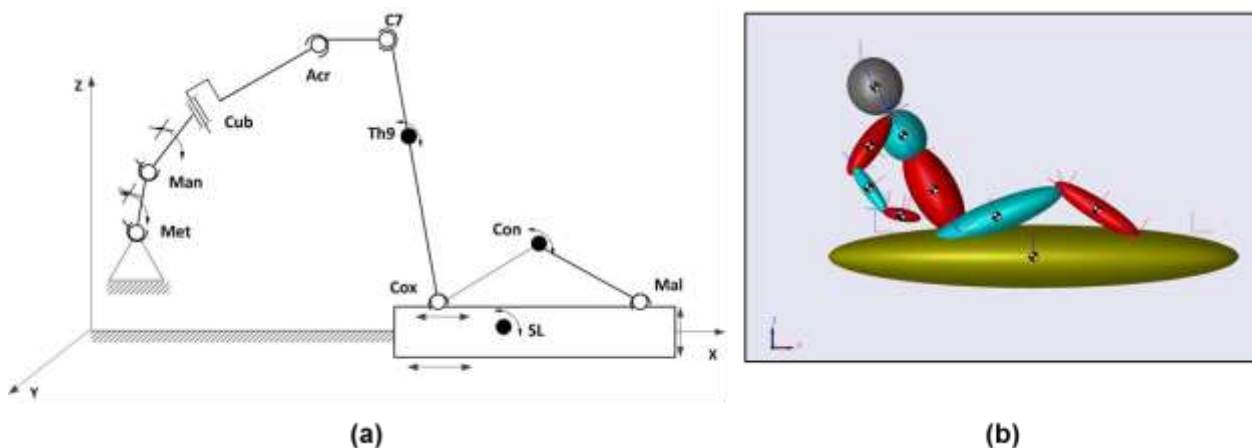
Ievietojot koordinātes x_{Cox} , z_{Cox} , β_{Th9} , β_{LT9} , δ_{Elb} , α_{H2} , β_{H2} un β_{F2} modelī D1, datora modelēšanas vidē iespējams imitēt starta II un III fāzes kustības, kas pēc vizuālās novērtēšanas ir ļoti tuvas reālām sportista kustībām. Grafiski pārbaudot modeļa D1 aprēķinātās punktu koordinātes redzams, ka tās gandrīz pilnībā sakrīt ar kustību analīzes rezultātiem. 3.19. attēlā parādītas divas koordinātes, kurās novērojamas nelielas atšķirības starp kustības imitēšanas rezultātiem un references datiem. Šīs atšķirības ir mērīšanas kļūdas robežās, bet pārējo koordinātu vērtības sakrīt ar kustību analīzes rezultātiem, tādēļ modeli D1 var uzskatīt par piemērotu ķermeņa augšējās daļas kustību imitēšanai kamaniņu sākotnējo starta fāžu izpildē.

Vienpusējs modelis ar kājas segmentiem

Visa ķermeņa vienpusēja modeļa iegūšanai, iepriekš izveidotam modelim D1 pievieno kājas segmentus – atbilstoši 16. un 23. sākotnējiem pieņēmumiem tie ir augšstilba un apakšstilba segmenti, jo pēdas segments modelī netiek iekļauts. Augšstilba segmentu savieno ar torsa segmentu trīskustīgajā kinemātiskajā pāri punktā Cox ar lodes šarnīra starpniecību (21. pieņēmums). Atšķirībā no augšdelma segmenta, šajā gadījumā nav nepieciešams veidot papildus savienojošo segmentu, jo atbilstoši ķermeņa daļu anatomiskajiem ierobežojumiem punkti Cox un Sacr ir savienoti nekustīgi (13. pieņēmums). Brīvības pakāpes punktus Con un Mal atbilst 20. un 24. sākotnējiem pieņēmumiem (vienkustīgs augšstilba un apakšstilba savienojums punktā Con un trīskustīgs apakšstilba savienojums ar kamanu segmentu punktā Mal). Izveidotajā modelī (uz sportista B2 mērījuma piemēra) attālums L' no punkta Mal līdz segmenta SL priekšējai daļai ir 0,21 m.

Modelim ar kājas segmentiem (modelis E1) tiek pievienotas arī iepriekš izslēgtās brīvības pakāpes: torsa segmenta virze gar kamanu garenisko asi un kamanu segmenta rotācija ap Y asi. Tā kā punktā Cox (Sac) torsa segmentam ir iespēja pārvietoties gar kamanu segmenta X_{SL} asi, tad kamanu segmenta savienošana ar statni vairs netiek modelēta punkta Cox projekcijā uz ledu, kā iepriekšējos modeļos, bet gan kamanu centra projekcijā uz ledu. Modeļa E1 kinemātiskās ķēdes shēma un vizualizēšana datora modelēšanas vidē ir parādītas 3.20. attēlā. 3.13. tabulā ievietoti iepriekš neizmantotie dati, kas nepieciešami modeļa E1 izveidei.

Līdzīgi kā aprakstīts iepriekš, lai izvairītos no kājas segmentu leņķisko koordinātu izgūšanas no kustību analīzes rezultātiem, punktus Con un Mal pievieno „iedomājamām statnēm” ar „bezsvara locītavām”, atstājot šajos savienojumos sešas brīvības pakāpes.



3.20. att. Modelis E1 – vienas pusējs ķēmes modelis ar kājas segmentiem

(a) kinemātiskās ķēdes shēma; (b) vizualizēšana ar ekvivalentajiem elipsoīdiem datora modelēšanas vidē.

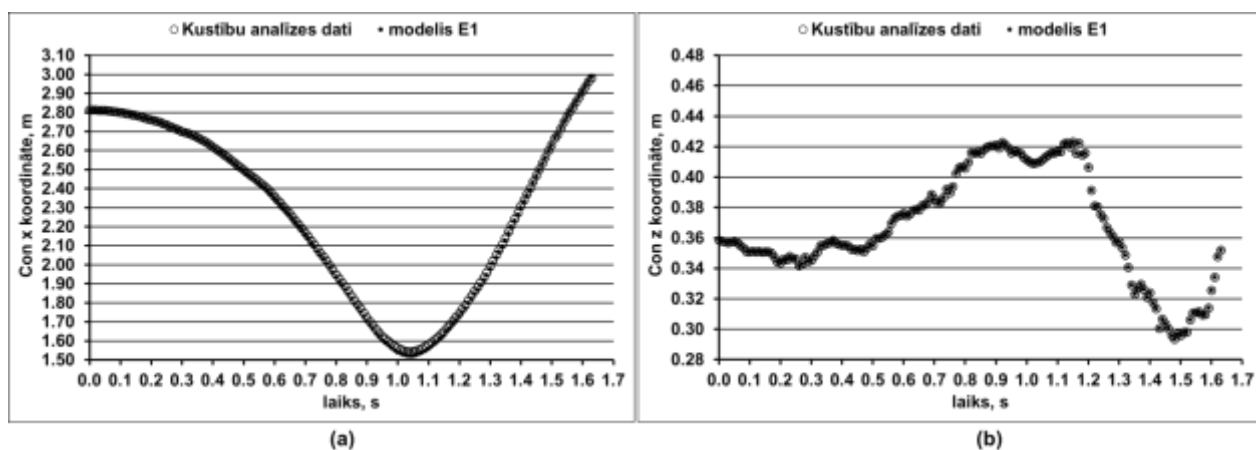
3.13. tabula

Papildus sākotnējie dati modeļa E1 izveidei

	Cox	Con	Mal	SLb	Augšstilbs	Apakšstilbs
x koordināte, m	2,39	2,80	3,09	2,67	—	—
y koordināte, m	0,63	0,62	0,60	0,82	—	—
z koordināte, m	0,19	0,36	0,19	0,03	—	—
garums, m	—	—	—		0,45	0,33
Z_{Segm} projekcijas leņķis ar Z YZ plaknē	—	—	—		-1°	-3°
Z_{Segm} projekcijas leņķis ar Z XZ plaknē	—	—	—		-112°	-58°

Kustību imitēšanai ar modeli E1 bez modelī D1 lietotām vispārinātām koordinātēm ir nepieciešamas vēl trīs: punkta SLb x koordināte, punkta Con y koordināte (kuras izmaiņas ir būtiskas starta II un III fāzes izpildes laikā) un punkta Mal z koordināte. Koordināte x_{Cox} vairs neattēlo kamanu un gūžas vienoto pārvietojumu gar X asi, bet apraksta modelī E1 atļauto torša segmenta virzi gar kamanu garenisko asi. Koordināte z_{Mal} tiek izmantota nevis kamanu un apakšstilba savienošanas „locītavā”, kurā ir atļautas tikai rotācijas brīvības pakāpes, bet punkta Mal savienojumā ar „iedomājamu statni”.

Koordinātu z_{Mal} un z_{SLb} izmantošana modeļa „kustināšanai” ļauj imitēt kamanu segmenta rotāciju ap Y asi. To var panākt arī izmantojot punkta Cox z koordināti – tādā gadījumā „iedomājamai statnei” pievieno punktu Cox, nevis potītes locītavas punktu Mal, un atkrīt nepieciešamība kustību analīzes procedūrā kartēt punktu Mal. Bet tā kā sportistu izvietojums kamanās variē un dažos gadījumos punkts Cox vertikālā virzienā var projicēties uz punktu SLb, precīzai starta kustību datora modelēšanai piemērotāka ir koordināte z_{Mal} , nevis z_{Cox} . Punktā Mal nav atļautas virzes kustības relatīvi pret kamanu segmentu, tādēļ punkta Mal vai Con x koordināti varētu izmantot x_{SLb} koordinātes vietā kamanu gareniskā pārvietojuma attēlošanai modelī. Bet tā kā pieņēmums par iespējamām brīvības pakāpēm punktā Mal (24. sākotnējais pieņēmums) ir zināms vienkāršojums, un modelējot dažādus starta kustību variantus var būt nepieciešams paplašināt pieļaujamo kustību diapazonu potītes punktā, tad koordinātes x_{SLb} izmantošana ir vairāk piemērota kamanu segmenta virzes imitēšanai un daļēji sagatavo modeli E1 tālākai uzlabošanai. Modeļa E1 elementu savienošanas shēma ievietota kopā ar pārējām shēmām 8. pielikumā.



3.21. Vienpusēja ķermeņa modeļa E1 rezultātu salīdzinājums ar kustību analīzes datiem

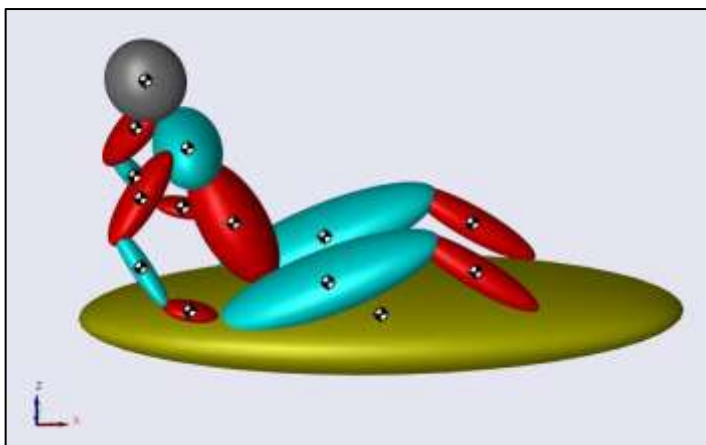
(a) punkta Con x koordināte; (b) punkta Con z koordināte.

Kustības imitēšanas rezultātā iegūtās koordinātes visiem punktiem labi sakrīt ar references (kustību analīzes) datiem (3.21. attēls un 9. pielikums). Netika novērotas rādītāju atšķirības, kas pārsniegtu mērījuma kļūdu. 3.21. attēlā ir parādītas divas kāju segmentu punktu koordinātes (ceļa locītavas koordinātes x un z), kas netika izmantotas modeļa E1 „kustināšanai”. Redzams, ka koordināte z_{Con} pilnībā sakrīt ar references datiem, bet koordinātes x_{Con} atšķirība no kustību analīzes rezultātiem ir mērījuma kļūdas robežās.

Divpusējs ķermeņa modelis

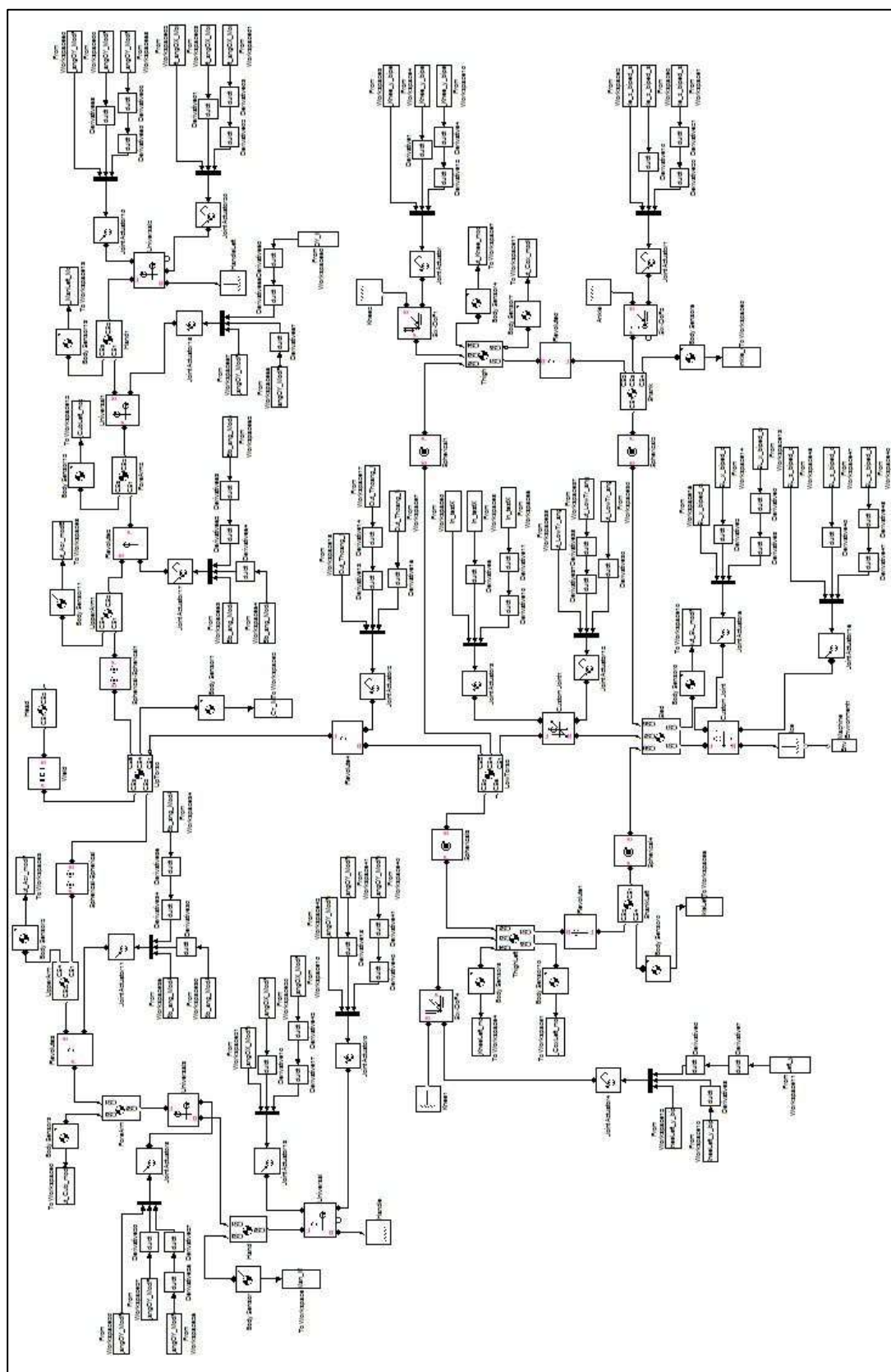
Pēc modeļa aprēķināto koordinātu salīdzinājuma ar references datiem var secināt, ka izstrādātais modelis E1 pietiekoši labi atspoguļo sportista kustības starta izpildes laikā un ir piemērots kamaniņu starta sākotnējo fāžu modelēšanai.

Pirms modeļa izveides tika pieņemts, ka sportista ķermenis ir simetrisks (6. sākotnējais pieņēmums), tāpēc pilna divpusēja modeļa iegūšanai modelim E1 brīvajos punktos LCox un LAcr ķermeņa kreisajā pusē pievieno tādus pašus rokas un kājas segmentus, kā jau ir izveidoti iepriekš labajā pusē (3.22. attēls). Pirmajā tuvinājumā tika pieņemts, ka arī sportista kustības labajā un kreisajā ķermeņa pusē sakrīt, tāpēc divpusēja ķermeņa modeļa „kustināšanai” katram segmentu pārim izmanto vienas un tās pašas koordinātes, ar pretējo zīmi ņemot tikai y koordinātes izmaiņas (mūsu gadījumā tas attiecas tikai uz punkta Con koordināti y_{Con}) un pagriezienu ap X asi leņķiskās vērtības (mūsu gadījumā – plaukstas orientācijas leņķi α_{H2}), kā arī segmentu sākotnējās orientācijas leņķus YZ plaknē (skat. 3.11., 3.12. un 3.13. tabulas).

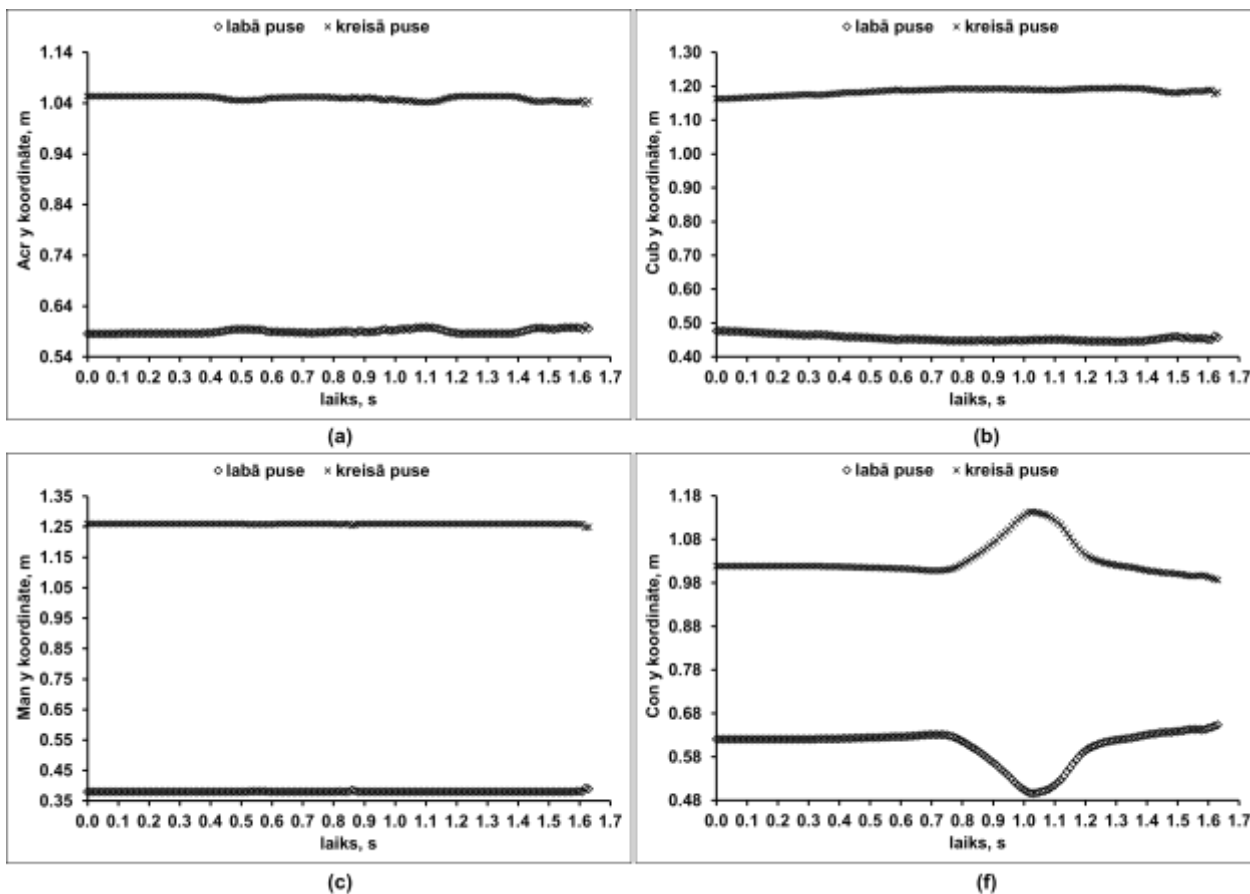


3.22. att. Pilna divpusēja ķermeņa modeļa vizualizēšana ar ekvivalentiem elipsoīdiem datora modelēšanas vidē

Tā kā izveidotajā modelī punkts Mal ir pievienots kamanu segmentam un šajā punktā netiek pieļautas neatkarīgas virzes kustības, tad pilna ķermeņa modeļa „kustināšanai” „dzenošo” locekli ir pietiekoši pievienot punktam Mal tikai vienā pusē (RMal), kā tas tika izdarīts modelī E1. Kustības punktā LMal ir pilnīgi noteiktas ar kamanu segmenta kustībām. Kopā kustību imitēšanai ar pilna ķermeņa modeli ir nepieciešamas 11 koordinātes, kas tika izmantotas modelī E1, un papildus ir jāpievieno „dzenošie” locekļi punktiem LCon (ar koordināti $[(-1) * y_{Con}]$), LCub (ar koordināti δ_{Elb}), LMan (koordināte β_{F2}) un LMet (koordinātes $[(-1) * \alpha_{H2}]$ un β_{H2}).

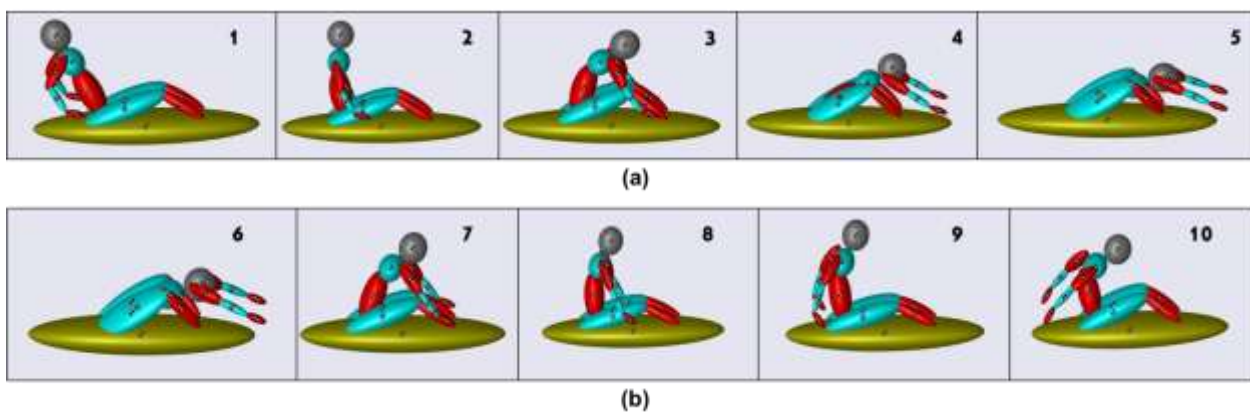


3.23. att. Divpusēja ķermeņa modeļa elementu savienošanas shēma datorā modelēšans vidē



3.24. att. Modeļa punktu y koordinātu salīdzinājums labajā un kreisajā pusē

(a) punkti RAcr, LAcr; (b) punkti RCub, LCub; (c) punkti RMan, LMan; (d) punkti RCon, LCon.



3.25. att. Starta kustību imitēšana izmantojot divpusēju ķermeņa modeli

(a) II starta fāze; (b) III starta fāze.

Modelēšanas precizitātes paaugstināšanai katram ķermeņa segmentam var izmantot tam atbilstošās individuālās koordinātu vērtības. Izveidotā modeļa elementu savienošanas shēma datora modelēšanas vidē ir parādīta 3.23. attēlā.

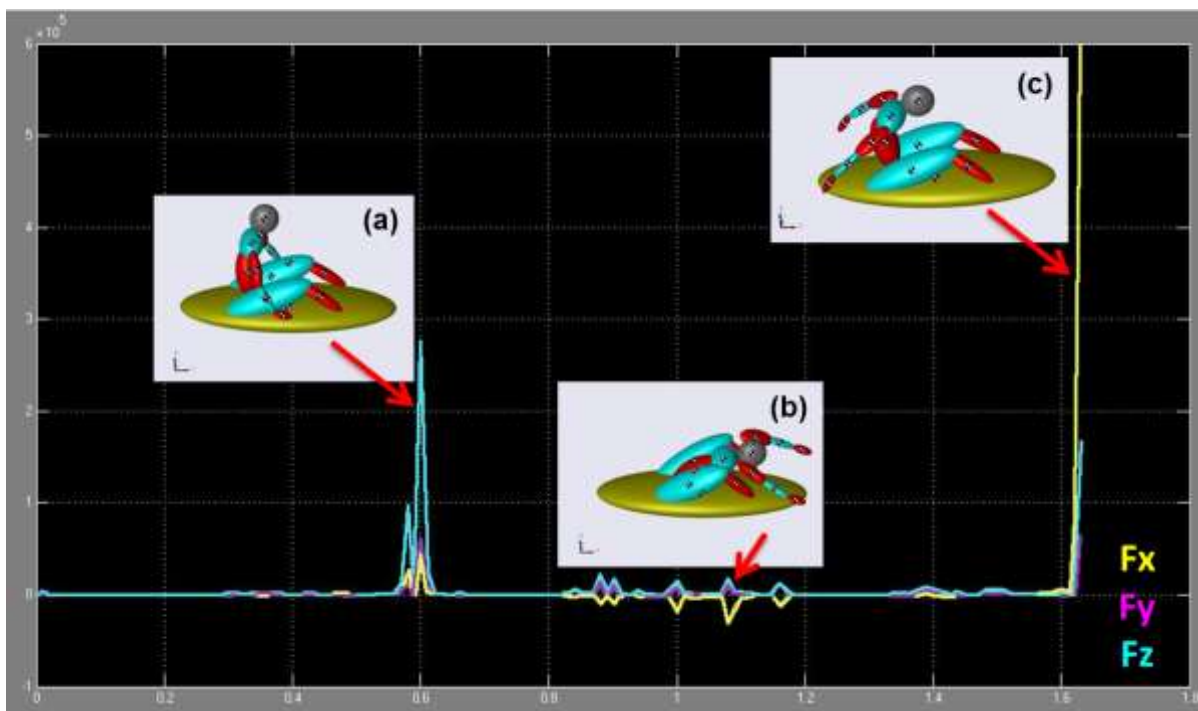
Kustību imitēšanā ar izveidoto modeli, izmantojot aprakstītās koordinātes, iegūst tādas pašas koordinātu vērtības, kā ar modeli E1. Labās un kreisās puses punktu x un z koordinātu vērtības sakrīt, bet y vērtības ir simetriskas pret kamanu garenisko asi. 3.24. attēlā parādītas rokas segmenta un ceļa locītavas punktu y koordinātu salīdzinājumi labai un kreisai ķermeņa pusei. Divpusēja ķermeņa modeļa kustības vizuāli pietiekoši labi attēlo reālās sportista kustības starta izpildes laikā – 3.25. attēls demonstrē starta II un III fāzes izpildes kinogrammas vizualizētas datora modelēšanas vidē. Izstrādātais modelis ir piemērots idealizētas starta kustības imitēšanai, kad ir izslēgtas pēdu kustības gar kamanām, bet nepieciešamības gadījumā šāds modelis ir viegli pielāgojams arī pēdu segmentu kustību attēlošanai.

3.3.6. Dināmisko parametru novērtēšana

Izveidotajā ķermeņa modelī tika ievadītas segmentu masas un inerces rādītāji, kā arī punktu koordinātu, ātrumu un paātrinājumu laika funkciju vērtības, kas ļauj modelēšanas programmatūras algoritmam veikt reakcijas spēku novērtējumu segmentu savienošanas vietās („locītavās”). Šim nolūkam modeļa elementu shēmā jāievieto spēka sensori vai osciloskopu imitējošie elementi, kas ļauj attēlot reakcijas spēkus grafiski (8. pielikums).

3.26. attēls demonstrē no izveidotā modeļa izgūto reakcijas spēku grafiku atkarībā no laika; attēlotie spēki ir noteikti plaukstas segmenta un statnes („starta roktura”) savienošanas vietā un imitē reakcijas spēkus uz starta roktura. Reakcijas spēki labajā un kreisajā modeļa pusē sakrīt.

Uz starta rokturiem pieliktais spēks ir viens no svarīgākajiem kamaniņu starta izpildi raksturojošiem parametriem. Pašreiz Siguldas starta estakādē un trasē nav ierīkotas spēka mērīšanas iekārtas, tāpēc reālos treniņu vai sacensību apstākļos nav iespējams tiešā veidā veikt starta rāviens spēka noteikšanu. Arī literatūrā nav pieejami dati par kamaniņu starta izpildē attīstāmo spēku vērtībām. References datu trūkuma dēļ nav iespējams pārbaudīt un verificēt izstrādātā modeļa aprēķinātās spēku vērtības, tāpēc iegūtās absolūtās vērtības šobrīd nevar būt pielietotas praksē. Taču novērtēto spēku relatīvās vērtības var būt izmantotas starta mēģinājumu salīdzināšanai un raksturošanai, kas būtiski palielina kamaniņu starta biomehāniskās analīzes iespējas.



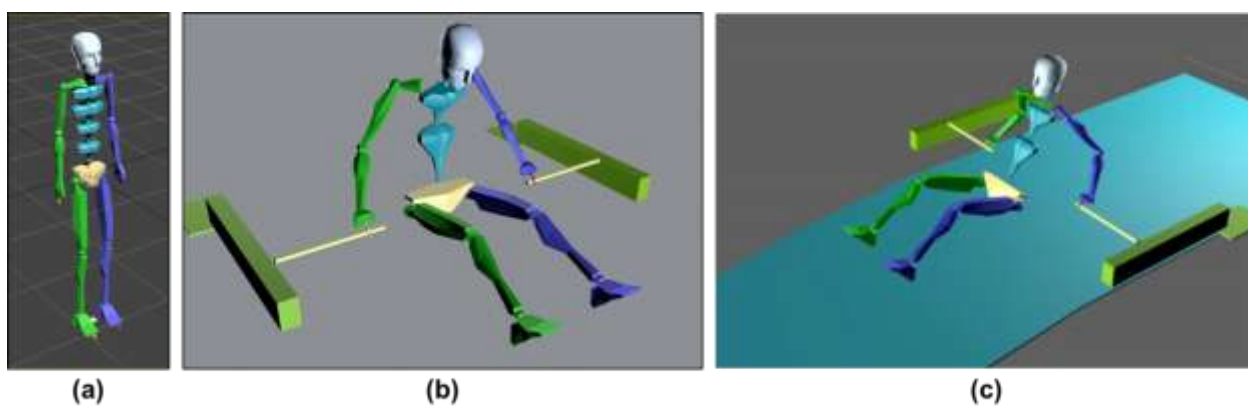
3.26. att. Divpusēja ķermeņa modeļa aprēķinātie reakcijas spēki plaukstas un roktura savienošanas punktā ar spēku maksimumiem atbilstošo starta fāžu vizualizēšanu

Grafikā redzamie spēku lokālie maksimumi pēc laika skalas atbilst tiem momentiem starta izpildē, kuros šādi maksimumi ir sagaidāmi – aizmuguriskā kustībā ķermenim izejot vertikālo stāvokli ir novērojams spēka z-komponentes maksimums (a), uzsākot kustību uz priekšu ir novērojams spēka x-komponentes lokālais maksimums (b), un izpildot atgrūšanos no starta rokturiem III starta fāzes beigās ir novērojams spēka x-komponentes maksimums pretējā virzienā (c). Novērojamā spēku maksimumu atbilstība sportista kustībām norāda, ka iegūtie spēka mērījumi vismaz daļēji ir piemēroti starta izpildes analīzei.

Biomehāniskās analīzes kvalitātes uzlabošanai ir nepieciešamas novērtēto spēku precizitātes pārbaudes, kas pieprasa papildus iekārtu izveidi un iziet ārpus šī darba ietvariem. Bet modeļa aprēķināto spēku relatīvās vērtības kopā ar starta laika mērījumiem jau pašlaik var būt pievienotas treniņu atgriezeniskajā saitē sniedzamai informācijai.

3.4. Starta tehnikas vizualizēšanas modelis

Starta II un III fāzes vizualizēšanas modelis tika izveidots izmantojot 3ds Max programmatūras vizualizēšanas un animācijas moduļa Character Studio instrumentu Biped. Instruments Biped ļauj veidot saistītu segmentu modeļus, tai skaitā arī cilvēka ķermeņa modeļus, un pēdējā gadījumā cilvēka ķermeņa daļu imitēšanai ir iespējams lietot programmatūras katalogā esošos elementus, kuru savstarpējo kustību ierobežojumi ir maksimāli tuvinātas dabiskām cilvēka kustību iespējām. Izveidotajos modeļos netiek pieļauts elementu savienojuma pārrāvums un saistīto segmentu neatkarīgas kustības (izņemot brīvos gala segmentus), kas atbilst reālā dabā pastāvošiem ierobežojumiem. Izmantotais instrumenta Biped sākotnējais (izejas) modelis ir parādīts 3.27. attēlā (a).



3.27. att. Vizualizēšanas modelis

(a) instrumenta Biped sākotnējais modelis; (b) kamaniņu starta vizualizēšanas modelis; (c) vizualizēšanas modelis ievietots starta estakādes modelī.

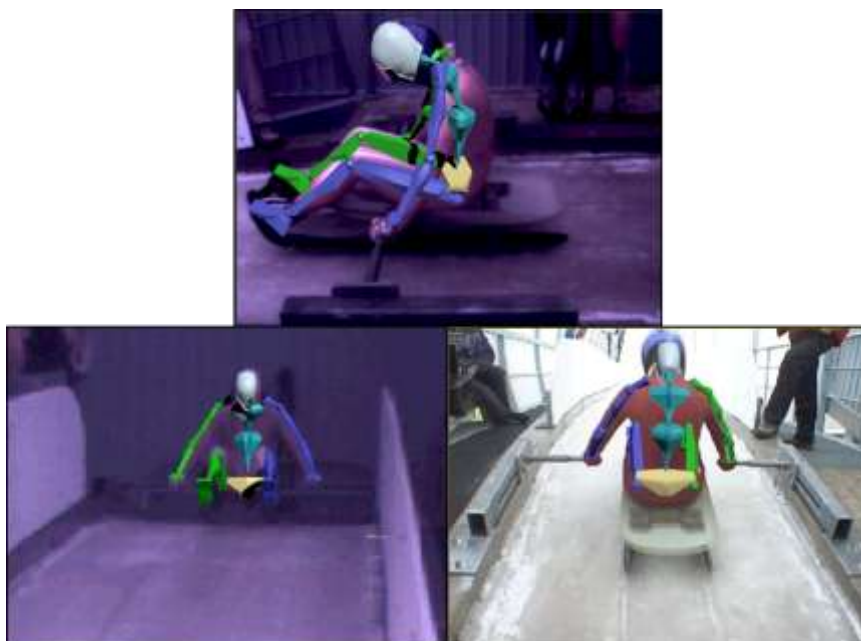
Izveidotais sportista ķermeņa vizualizēšanas modelis (kamanas netika iekļautas šajā modelī) sastāv no tādiem pašiem segmentiem, kā iepriekš aprakstītais kinemātiskais modelis: galvas, divu segmentu torša (jeb muguras), augšdelmu, apakšdelmu, plaukstu, augšstilbu un apakšstilbu segmentiem, bet ir papildināts ar viena segmenta kakla, viena segmenta iegurņa un plecu segmentiem, kas ir saistīts ar izvēlētās modelēšanas programmatūras īpatnībām, kā arī modelī ir iekļauti pēdu segmenti (3.27. attēls (b)). Pēdu segmenti ir iekļauti tikai estētisko apsvērumu dēļ, to kinemātika netiek izskatīta, un savienojums ar apakšstilbu segmentiem ir nekustīgs. Plecu segmenti vizualizēšanas modelī kalpo roku un torša segmentu savienošanai (kinemātiskajā modelī šo funkciju pilda „bezsvara savienotāji”).

Galvas segments ir nekustīgi savienots ar kakla segmentu un šo segmentu kopējās kustības nosaka punktu Vert un C7 kinemātika. Torsa, kakla un galvas kustības ir ierobežotas līdz plakaniskām (XZ plaknē).

Segmentu garumi atbilst kinemātiskā modeļa segmentu garumiem un ir ņemti pēc sportista B2 antropometriskiem rādītājiem; mainot segmentu garumus, vizualizēšanas modelis ir pielāgojams arī citiem sportistiem. Izveidotā modeļa segmentu savienošo „locītavu” atrašanās vietas sakrīt ar kinemātiskajā modelī izmantotajiem segmentu robežpunktiem (vizualizēšanas modelī punkts C7 savieno kakla un torsa augšējās daļas segmentus).

Kustību attēlošanai ar vizualizēšanas modeli izmanto locītavu punktu koordinātu laika funkcijas, bet atšķirībā no kinemātiskā modeļa, nav nepieciešams uzdot ātruma un paātrinājuma vērtības. Ir iespējams attēlot kustības arī ar leņķiskām koordinātēm – tādā gadījumā tiek izmantoti Eilera leņķi, bet līdzīgi kā gadījumā ar kinemātisko modeli ir apgrūtināta leņķu vērtību interpretācija. Savukārt lineāro koordinātu vērtības ir iespējams importēt 3D modelēšanas programmatūrā tiešā veidā vai nu no kustību analīzes programmatūras (Simi Motion), vai no datora modelēšanas (SimMechanics) vides. Kustību teorētiskās modificēšanas gadījumā ķermeņa koordinātes iegūst no kinemātiskā modeļa. Izveidotais vizualizēšanas modelis precīzi attēlo sportista kustības, ko var pārbaudīt savietojot modeli un kustību videoierakstu atbilstošās projekcijās (3.28. attēls).

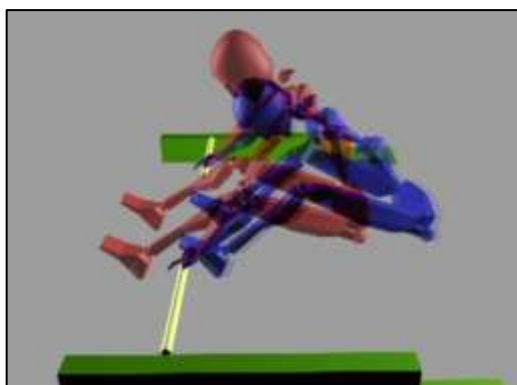
Vizualizēšanas modelis ir izstrādāts tajā pašā programmatūrā, kurā tika konstruēts starta estakādes modelis, tāpēc sportista ķermeņa modeli var ievietot iekš estakādes modeļa, tādā veidā imitējot sportista pārvietošanos reālajā treniņu vidē (3.27. attēls (c)). Divu modeļu savienošana ļauj uzreiz ievietot vizualizēšanas modeli starta estakādes koordinātu sistēmā, kura atbilst kustību analīzes programmatūrā izmantotajai koordinātu sistēmai. Izmantotā 3D modelēšanas programmatūra ļauj noteikt modeļa telpā (mūsu gadījumā – estakādē) esošo punktu koordinātes, tādēļ pārklājot vizualizēšanas modeli ar kustību videoierakstu vairākās projekcijās (3.28. attēls) un katrā kadrā panākot ķermeņa un modeļa pozīciju sakrīšanu, var iegūt sportista ķermeņa locītavu koordinātes. Šādu pieeju var izmantot kā alternatīvu kustību analīzes procedūrai. Savienoto segmentu modeļa priekšrocība tādā gadījumā ir segmentu pastāvīgā garuma nodrošināšana, kas palielina koordinātu noteikšanas precizitāti salīdzinājumā ar parasto kustību analīzes procedūru, kurā kartējamie punkti nav saistīti savā starpā.



3.28. att. Vizualizēšanas modeļa un videoierakstu savietošanas trīs projekcijās

Izstrādātais vizualizēšanas modelis kalpo trīs galvenajiem nolūkiem:

- nodrošina efektīvu starta tehnikas salīdzināšanu datora ekrānā, ļaujot pārklāt vai izvietot blakus divus vai vairākus startu attēlojošus modeļus, kā arī brīvi izvēlēties apskata leņķi (3.29. attēls);
- ļauj vizualizēt teorētiski modificētu un uzlabotu starta kustību, kuras parametri ir iegūti no kinemātiskā modeļa, taču pati kustība nav izpildīta realitātē;
- ir alternatīvs punktu telpisku koordinātu noteikšanas variants no sinhronizēto videoierakstu virknes.



3.29. att. Divu starta mēģinājumu salīdzināšana ar vizualizēšanas modeli

SECINĀJUMI

1. Izveidotais kamaniņu starta kinemātiskais datormodelis ļauj reālistiski imitēt sportistu kustības II un III starta fāzēs, noteikt reakcijas spēkus locītavās, kā arī prognozēt teorētiski optimizētās kustības kinemātiskos un dināmiskos rādītājus.
2. Kamaniņu starta datormodelī izmantojamais muguras segmentu skaits ir vismaz divi.
3. Precīzai kamaniņu starta datora modelēšanai nepieciešams veidot trīs segmentu rokas modeli.
4. Minimālais nepieciešamais brīvības pakāpju skaits plaukstas locītavas modelī ir divi – rotācija ap priekšēji-aizmugurējo un mediāli-laterālo asi.
5. Sākotnējās kamaniņu starta fāzēs sportists pārvietojas relatīvi pret kamanu garenisko asi, tāpēc kamanu un sportista masu centru ātrumi ir atšķirīgi.
6. Izstrādātais starta vizualizēšanas modelis ļauj vizualizēt interesējošo kustību jebkurā plaknē, efektīvi salīdzināt savā starpā divus vai vairākus starta mēģinājumus vienam vai vairākiem sportistiem, kā arī vizualizēt teorētiski modelēto kustību un uzlabot punktu telpisko koordinātu rekonstrukcijas procedūru.
7. Kamaniņu starta laika korelācija ar finiša laiku ir atšķirīga dažādās pasaules trasēs.
8. Izstrādātā kalibrēšanas metodika locītavu un citu punktu telpisku koordinātu rekonstrukcijai no videoierakstiem ir pielietojama sportistu treniņu un sacensību vietās; izstrādātā metodika nodrošina koordinātu novērtēšanas precizitāti un salīdzinājumā ar standarta metodiku būtiski atvieglo kustību analīzes procedūru.
9. Konstruētais Siguldas starta estakādes datormodelis lietojams koordinātu rekonstrukcijai kamaniņu startā un ir viegli adaptējams darbam ar bobsleja un skeletoņa startu.

CONCLUSIONS

1. The developed kinematically-driven computer model of luge start allows realistic movement simulation during phases II and III of the start, sensing of reaction forces in joints and prediction of kinematic and kinematic variables of a theoretically optimized motion.
2. At least two segments are required to model the torso in luge start.
3. Three-segment arm model is required for an accurate computer modelling of the start in luge.
4. A minimum required number of wrist joint model DOF is two – rotation around anteroposterior and mediolateral axes.
5. During the initial start phases in luge an athlete moves relatively to the longitudinal axis of the sled, therefore the velocities of athlete's and sled's centres of masses are different.
6. The developed visualization model of the start allows visualization of the start movement in an arbitrary plane, an effective comparison of two or more start attempts of one or several athletes, visualization of a theoretically modelled motion, as well as refinement of the coordinates' reconstruction procedure.
7. Correlation between luge start and finish times varies at different world tracks.
8. The developed cameras' calibration procedure is applicable for reconstruction of spatial coordinates of body landmarks and other points from videorecords, captured at training and competitive environment of the athletes; the developed procedure provides accurate assessment of coordinates' values and comparing to the standard procedure considerably increases efficiency of the motion capture process.
9. The developed computer model of Sigulda start ramp is applicable for reconstruction of coordinates in lugers' start and is easily adjustable for bobsleigh and skeleton start analysis.

DARBA APROBĀCIJA

Galvenie pētījumu rezultāti atspoguļoti sekojošās publikācijās (5., 7., 8., 9., 11., 12., 14., 15., 16. un 17.) un konferenču tēzēs (1., 2., 3., 4., 6., 10. un 13.):

1. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Simplified Planar Kinematic Chain Model of Initial Start Phases in Lugging. Abstracts of the 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium; July 4-7th, 2012 (CD-ROM).
2. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Power Production during the Initial Phases in Lugging: a Preliminary Study. Abstracts of the 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium; July 4-7th, 2012 (CD-ROM).
3. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Computer Modelling in Sport Movement Analysis – Simplification of Model Drivers. Abstracts of the 5th Baltic Sport Science Conference “Current Issues and New Ideas in Sport Science”, Kaunas, Lithuania; April 18-19th, 2012, 65.
4. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). 3D Camera Calibration for Motion Tracking in Recurrent Athletic Environment. Abstracts of the 5th Baltic Sport Science Conference “Current Issues and New Ideas in Sport Science”, Kaunas, Lithuania; April 18-19th, 2012, 64.
5. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Variability of Timing Parameters of Starts Performed by Lugers with Different Competitive Experience. Scientific Materials, 2011, 13, 419–427.
6. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Comparison of lugers' start elements on a sliding track and an iced start ramp. In: Soares S., Sousa F., Veloso A., Vilas-Boas J.P. (Eds.), Programme and Abstracts Book of the 29th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, Porto, Portugal; June 27th – July 1st, 2011, 136.
7. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Comparison of lugers' start elements on a sliding track and an iced start ramp. In: Vilas-Boas J.P., Machado L., Wangdo K., Veloso A. (Eds.), Portuguese Journal of Sport Sciences, 2011, 11(Suppl. 2), 223–226.
8. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Timing Rhythm in Female Lugers' Starts. Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis, 2011, 16(supplement), 80.

9. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Comparison of Bobsleigh Performance at St. Moritz Track. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*, 2011, 16(supplement), 79-80.
10. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Variability of Timing Parameters of Starts Performed by Lugers with Different Competitive Experience. Book of abstracts of the XV International Conference “Physical Activity of People at Different Age”, Szczecin, Poland; December 2-3rd, 2010, 23.
11. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Timing characteristics of female lugers' starts on iced start ramp. *Вісник Чернігівського державного педагогічного університету. Педагогічні науки. Фізичне виховання та спорт*, 2010, 81, 679–682.
12. Fedotova V. Influence of Track Interval Times on the Total Run Time in Skeleton and the Sport of Luge. *Sport Science (Sporto Mokslas)*, 2010, 3(61), 47–55.
13. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Biomechanical Patterns of Starting Technique during Training and Competitive Events for Junior Lugers. Book of Abstracts of the 6th World Biomechanics Congress, Singapore; August 2-6th, 2010, 88.
14. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Biomechanical Patterns of Starting Technique during Training and Competitive Events for Junior Lugers. *IFMBE Proceedings*, 2010, 31, 282–285.
15. Федотова В.А. (datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), Пилипив В.М. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Наглядное представление данных в мультимедийных методических пособиях для спортсменов и тренеров. Материалы международной научно-практической конференции «Информационное пространство современной науки», Чебоксары, Российская Федерация; 6 февраля, 2010, 171–174.
16. Федотова В.А. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), Пилипив В.М. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Использование программного обеспечения удаленного доступа для реализации анализа движения спортсменов в условиях учебно-тренировочных сборов. Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы физической культуры и спорта», Чебоксары, Российская Федерация; 10 декабря, 2009, 217–220.
17. Fedotova V. (eksperimenta plānošana, datu reģistrācija un apstrāde, publikācijas izstrāde), , Pilipiv V. (aparātūras sagatavošana, datu reģistrācija). Preparing Video-Based Teaching Aids for Elite Athletes: Software Choice. V Jauno zinātnieku konferences rakstu krājums, Rīga, Latvija; 2009. gada 2. decembris, 32–39.

Par pētījumu rezultātiem ziņots sekojošās vietējās un starptautiskās konferencēs:

1. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Simplified Planar Kinematic Chain Model of Initial Start Phases in Luge. The 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium, July 4-7th, 2012. Abstract book page No.
2. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Power Production during the Initial Phases in Luge: a Preliminary Study. The 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium, July 4-7th, 2012. Abstract book page No.
3. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Computer Modelling in Sport Movement Analysis – Simplification of Model Drivers. The 5th Baltic Sport Science Conference “Current Issues and New Ideas in Sport Science”, Kaunas, Lithuania, April 18-19th, 2012. Abstract book page No. 65.
4. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. 3D Camera Calibration for Motion Tracking in Recurrent Athletic Environment. The 5th Baltic Sport Science Conference “Current Issues and New Ideas in Sport Science”, Kaunas, Lithuania; April 18 – 19th, 2012. Abstract book page No. 64.
5. Fedotova V. Latvian Olympic Team – a practical experience in Motion Capture. International Symposia „Sports Science in Elite Sports: Putting Theory into Practice”, Leuven, Belgium, September 12-15th, 2011.
6. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Comparison of luges’ start elements on a sliding track and an iced start ramp. The 29th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, Porto, Portugal, June 27th – July 1st, 2011. Abstract book page No. 136.
7. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Timing Rhythm in Female Luges’ Starts. The 4th Baltic Sport Science Conference, Tartu, Estonia, April 7-9th, 2011.
8. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Comparison of Bobsleigh Performance at St. Moritz Track. The 4th Baltic Sport Science Conference, Tartu, Estonia, April 7-9th, 2011.
9. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Variability of Timing Parameters of Starts Performed by Luges with Different Competitive Experience. The 15th International Conference “Physical Activity of People at Different Age”, Szczecin-Malkocin, Poland, December 2-3rd, 2010. Abstract book page No. 23.
10. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Timing characteristics of female luges’ starts on iced start ramp. The 3rd International scientific conference in honour of A.Laputin "Present day issues of modern biomechanics of physical training and sports", Chernihiv, Ukraine, October 21-22nd, 2010.
11. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Biomechanical Patterns of Starting Technique during Training and Competitive Events for Junior Luges. The 6th World Biomechanics Congress, Singapore, August 2-6th, 2010. Abstract book page No. 88.
12. Федотова В.А. (ziņojums), Пилипив В.М. Наглядное представление данных в мультимедийных методических пособиях для спортсменов и тренеров. Международная научно-практическая конференция «Информационное пространство современной науки», Чебоксары, Российская Федерация, 6 февраля, 2010.

13. Федотова В.А. (ziņojums), Пилипив В.М. Использование программного обеспечения удаленного доступа для реализации анализа движения спортсменов в условиях учебно-тренировочных сборов. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы физической культуры и спорта», Чебоксары, Российская Федерация, 10 декабря, 2009.
14. Fedotova V. (ziņojums), Pilipiv V. Preparing Video-Based Teaching Aids for Elite Athletes: Software Choice. V Starptautiskā jauno zinātnieku konference, Rīga, Latvija, 2009. gada 2. decembris.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Abdel-Aziz Y.I., Karara H.M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry// Proceedings of Symposium on Close-Range Photogrammetry. – 1971. – 1–18 pp.
2. Abdi H. The Kendall Rank Correlation Coefficient. In Salkind N. J. Encyclopedia of Measurement and Statistics. – Thousand Oaks (CA): Sage, 2007. - 508 – 510 pp.
3. Alexander R.M. Simple models of walking and jumping// Human Movement Science. – 1992. – No.11. – 3 – 9 pp.
4. Apinis P. Cilvēks. Anatomija, fizioloģija, patoloģijas pamati. – Rīga: Nacionālais Medicīnas apgāds, 1998. – 800 lpp.
5. Baca A., Kornfeind P. Rapid feedback systems for elite sports training// IEEE Pervasive Computing. – 2006. – No.5. – 70 – 76 pp.
6. Bartlett R. Introduction to Sports Biomechanics. Analysing Human Movement Patterns. 2nd edition. – Abingdon: Routledge, 2007. – 315 p.
7. Bartlett R.M., Bussey M., Flyger, N. Movement variability cannot be determined reliably from no-marker conditions// Journal of Biomechanics. – 2005. – No.39 (16). – 3076 – 3079 pp.
8. Basler Vision Technologies. A601f, A602f and A622f Technical Details.– Basler Vision Technologies, 2010 – 2 p.
9. Basler Vision Technologies. Basler A600f User's Manual. – Document No. DA000561. – Version 09. – Language 000 (English). – Release date 07 December, 2010 – Basler Vision Technologies, 2010. – 180 p.
10. Baumer IVO. Operating Instructions. Electronic preselection counter, two preselections, NE 216. – 171.02.107/3. – IVO GmbH & Co., 2000 – 20 p.
11. Baumer IVO Incremental Encoders GI331, GI333. – Technical Information. – Baumer IVO GmbH & Co. KG, 2010 – 4 p.
12. Benoit D.L., Ramsey D.K., Lamontagne M., Xu L., Wretenberg P., Renström P. Effect of skin movement artifact on knee kinematics during gait and cutting motions measured in vivo// Gait & Posture. – 2006. – No.24 (2). – 152 – 164 pp.
13. Bezodis N.E., Trewartha G., Salo A.I.T. Understanding elite sprint start performance through an analysis of joint kinematics// Proceedings of XXVI International Symposium on Biomechanics in Sports, July 14 – 18, 2008, Seoul, Korea. – 498 – 501 pp.

14. Bruggemann G.P., Morlock M., Zatsiorsky V.M. Analysis of the Bobsled and Men's Luge Events at the XVII Olympic Winter Games in Lillehammer// Journal of Applied Biomechanics. – 1997. – No.13. – 98 – 108 pp.
15. Bullock N., Hopkins W.G. Methods for tracking athletes' competitive performance in skeleton// Journal of Sports Sciences. – 2009. – No.27/9. – 937 – 940 pp.
16. Bullock N., Hopkins W.G., Martin D.T., Marino F.E. Characteristics of performance in skeleton World Cup races// Journal of Sports Sciences. – 2009. – No.27/4. – 367 – 372 pp.
17. Bullock N., Martin D.T., Ross A., Rosemond A., Holland T., Marino F.E. Characteristics of the start in woman's World Cup skeleton// Sports Biomechanics. – 2008. – No.7 (3). – 351 – 360 pp.
18. Bullock N., Martin D.T., Ross A., Rosemond A., Marino F.E. Effect of Long Haul Travel on Maximal Sprint Performance and Diurnal Variations in Elite Skeleton Athletes// British Journal of Sports Medicine. – 2007. – No.41. – 569 – 573 pp.
19. Camomilla V., Cereatti A., Vannozzi G., Cappozzo A. An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method// Journal of Biomechanics. – 2006. – No.39. – 1096 – 1106 pp.
20. Casio Computer Co. Casio Digital Camera EX-FH20 User's Guide. – Casio Computer Co., Ltd, 210. – 176 p.
21. Challis J.H. Data processing and error estimation. In Payton C.J., Bartlett R.M., eds. Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise. – Abingdon: Routledge, 2008. – 129 – 152 pp.
22. Chapman E. Biomechanical Analysis of Fundamental Human Movements. – Champaign: Human Kinetics, 2008. – 320 p.
23. Chaze B., McDonald P. Head Injuries in Winter Sports: Downhill Skiing, Snowboarding, Sledding, Snowmobiling, Ice Skating and Ice Hockey// Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America. – 2009. – No.20/1. – 287 – 293 pp.
24. Cimpello L.B., Garcia M., Rueckmann E., Markevicz C. Sledding: how fast can they go?// The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care. – 2009. – No.66/3. – 23-S26 pp.
25. Cheung J. T.-M. Biomechanical modelling and simulation of foot and ankle. In Hong Y., Bartlett R., eds. Handbook of Biomechanics and Human Movement Science. – Abingdon: Routledge, 2008. – 65 – 80 pp.

26. Clauser C.E., McConville J.T., Joungh J.W. Weight, volume and COM of segments of the human body// AMRL Technical Report. – Aerospace Medical Research Laboratories, Ohio, 1969. – 69 – 70 pp.
27. Cummings R.S.Jr., Shurland A.T., Prodoehl J.A., Moody K., Sherk H.H. Injuries in the Sport of Luge. Epidemiology and Analysis// The American Journal of Sports Medicine. – 1997. – No.25/4. – 508 – 513 pp.
28. Dabnichki P., Avital E. Influence of the Position of Crew Members on Aerodynamics Performance of Two-Man Bobsleigh// Journal of Biomechanics. – 2006. – No.39. – 2733 – 2742 pp.
29. Dabnichki P., Motallebi F., Avital E. Advanced bobsleigh design. Part 1: body protection, injury prevention and performance improvement// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. – 2004. – No.218/2. – 129 – 137 pp.
30. Davis R.B., Õunpuu S., Tyburski D., Gage J.R. A gait analysis data collection and reduction technique// Human Movement Science. – 1991. – Vol.10. – No.5. – 575 – 587 pp.
31. Dumas R., Chèze L., Verriest J.-P. Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters// Journal of Biomechanics. – 2007. – No.40. – 543 – 553 pp.
32. Durkin J.L. Measurement and estimation of human body segment parameters. In Hong Y., Bartlett R., eds. Handbook of Biomechanics and Human Movement Science. – Abingdon: Routledge, 2008. – 197 – 213 pp.
33. Esch D., Lepley M. Musculoskeletal Function: An Anatomy and Kinesiology Laboratory Manual. – Minneapolis: University of Minnesota Press, 1976. – 126 p.
34. Fedotova V. Influence of track interval times on the total run time in skeleton and the sport of luge// Sporto Mokslas (Sport Science). – 2010. – No.3. (61) – 47 – 55 pp.
35. Fedotova V., Pilipiv V. Preparing Video-Based Teaching Aids for Elite Athletes: Software Choice. // V Jauno zinātnieku konferences rakstu krājums. – RPIVA, Rīga, 2010. – 32. – 39. lpp.
36. Glazier P.S., Davids K. Constraints on Complete Optimization of Human Motion// Sports Medicine. – 2009. – No.39(1). – 15 – 28 pp.
37. Goktepe A., Kocaman E. Analysis of camera calibrations using direct linear transformation and bundle adjustment methods// Scientific Research and Essays. – 2010. – No.5(9). – 869 – 872 pp.

38. Griffiths I.W. Principles of biomechanics and motion analysis. – Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2006. – 353 p.
39. Hahn B.D., Valentine D.T. Essential Matlab for Engineers and Scientists, 4th edition. – Oxford: Elsevier, 2010. – 382 p.
40. Hanavan E.P. A mathematical model of the human body// AMRL Technical Report. – Aerospace Medical Research Laboratories, Ohio, 1964. – 64 – 102 pp.
41. Hatze H. A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments// Journal of Biomechanics. – 1980 – No.13(10). – 833 – 843 pp.
42. Hatze H. Anthropomorphic Contour Approximation for Use in Inertial Limb Parameter Computation// Proceedings of the 12th International Conference on Mechanics in Medicine and Biology, September 9 – 13, 2002, Lemnos.
43. Hatze H. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach// Journal of Biomechanics. – 1988. – No.21. – 533 – 538 pp.
44. Hatze H. Parameter identification for human body segment models// Theoretical Issues in Ergonomics Science. – 2005. – No.6/3-4. – 331 – 334 pp.
45. Hoya Corporation Pentax Imaging Systems Division. Pentax Closed Circuit Television Lenses. – SEE 0804. – Hoya Corporation. – 2009. – 60 pp.
46. International Luge Regulations: Artificial Track. – Fédération Internationale de Luge de Course, 2008. – 72 p.
47. International Luge Regulations: Artificial track. – Fédération Internationale de Luge de Course, 2010. – 76 p.
48. International Rules Bobsleigh. – Fédération Internationale de Bobsleigh et de Tobogganing, 2010. – 65 p.
49. International Skeleton Rules. – Fédération Internationale de Bobsleigh et de Tobogganing, 2010. – 53 p.
50. Kearney J.T., Rundell K.W., Wilber R.L. Measurement of work and power in sport. In Garret J.R., Kirkendall D.T., eds. Exercise and sport science. – Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2000. – 31 – 52 pp.
51. Kempe M., Thorhauer H.A. Technikbild und Individualisierung – Untersuchungen im Startbereich des Rennschlittensports// Sportwissenschaft. – 1995. – No.25. – 63–74 pp.

52. King M.A., Glynn J.A., Mitchell S.R. Subject-specific computer simulation model for determining elbow loading in one-handed tennis backhand groundstrokes// *Sports Biomechanics*. – 2011. – No.4. – Vol.10. – 391 – 406 pp.
53. Kivi D., Smith S., Duckham R., Holmgren B. Kinematic Analysis of the Skeleton Start// *Proceedings of XXII International Symposium on Biomechanics in Sports*, August 8 – 12, 2004, Ottawa, Canada. – 450 – 452 pp.
54. Koh T.J., Grabiner M.D., de Swart R.J. In vivo tracking of the human patella// *Journal of Biomechanics*. – 1992. – No.25. – 637 – 643 pp.
55. Körner M., Pagani W., Seeholzer T. SIMI Motion Capture 3D Manual. – Unterschleissheim: SIMI GmbH, 2001. – 77 p.
56. Krosshaug T., Bahr R. A model-based image-matching technique for three-dimensional reconstruction of human motion from uncalibrated video sequences// *Journal of Biomechanics*. – 2005. – No.38. – 919 – 929 pp.
57. Kwon Y.-H. A non-linear camera calibration algorithm: Direct solution method// *Proceedings of XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports*, August 22 – 27, 2005, Beijing, China. – 142 pp.
58. Kwon Y.-H. Measurement for deriving kinematic parameters: numerical methods. In Hong Y., Bartlett R., eds. *Handbook of Biomechanics and Human Movement Science*. – Abingdon: Routledge, 2008. – 156 – 181 pp.
59. Lanka J. Šķēpa mēšanas biomehānika. – Rīga: Elpa-2, 2007. – 334 lpp.
60. Leardini A., Chiari L., Della Croce U., Cappozzo A. Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation// *Gait & Posture*. – 2005. – No.21 (2). – 212 – 225 pp.
61. Lember S., Schachner O., Raschner C. Development of a measurement and feedback training tool for the arm-strokes of high-performance luge athletes// *Journal of Sports Sciences*. – 2011. – No29 (15). – 1593 – 1601 pp.
62. Leonardi L.M., Cecioni N., Dal Monte A., Komor A. Push-off phase influence on bobsled result. A theoretical approach// *Journal of Biomechanics*. – 1985. – No.18/7. – 551 p.
63. Leonardi L.M., Komor A., Dal Monte A. An interactive computer simulation of bobsleigh pushoff phase with a multimember crew. In Jonsson B.J., ed. *Biomechanics X-B*. – Champaign: Human Kinetics, 1987. – 761 – 766 pp.
64. de Leva P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's Segment Inertia Parameters// *Journal of Biomechanics*. – 1996. – No.29/9. – 1223 – 1230 pp.

65. Lombrozo P.C., Barr R.E., Abraham L.D. Smoothing of noisy human motion data using digital filtering and spline curves// Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 10th annual International Conference. – 1988. – 653 – 654 pp.
66. McDonald J.H. 2009. Handbook of Biological Statistics. – Baltimore, Maryland: Sparky House Publishing, 2008. – 287 p.
67. Milner C.E. Motion Analysis Using On-line Systems. In Payton C.J., Bartlett R.M., eds. Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise. – Abingdon: Routledge, 2008. – 33 – 52 pp.
68. Mononen K. The effect of augmented feedback on motor skill learning in shooting: A feedback training intervention among inexperienced rifle shooters// Studies in Sport, Physical Education and Health. – Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2007. – No. 22. – 56 p.
69. Morlock M., Zatsiorsky V. Factors Influencing Performance in Bobsledding: I: Influences of the Bobsled Crew and the Environment// International Journal of Sports Biomechanics. – 1989. – No.5/2. – 208 – 221 pp.
70. Motallebi F., Dabnichki P., Luck D. Advanced bobsleigh design. Part 2: aerodynamic modifications to a two-man bobsleigh// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. – 2004. – No.218. – 139 – 144 pp.
71. Mullineaux D.R. Research methods: sample size and variability effects on statistical power. In Payton C.J., Bartlett R.M., eds. Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise. – Abingdon: Routledge, 2008. – 153 – 175 pp.
72. Muybridge E. The Human Figure in Motion. An Electro-Photographic Investigation of Consecutive Phases of Muscular Actions. Third impression. – London: Chapman & Hall, LD., 1907. – 277 p.
73. Nagano A., Komura T., Himeno R., Fukashiro S. A procedure for adjustment of body segmental parameter values to individual subjects in inverse dynamics// International Journal of Sport and Health Science. – 2004. – No. 2. – 156 – 162 pp.
74. Nagano A., Komura T., Himeno R., Fukashiro S. Optimal digital filter cutoff frequency of jumping kinematics evaluated through computer simulation// International Journal of Sport and Health Science. – 2003. – No. 1 (2). – 196 – 201 pp.
75. Nagano A., Yoshioka S., Fukashiro S., Himeno R. Investigation of Biomechanics of Human Motion Using Computer Simulation// Proceedings of Computational Biomechanics. RIKEN Symposium, RIKEN, Japan, 2006. – 69 – 72 pp.

76. Nagano A., Yoshioka S., Komuro T., Himeno R., Fukashiro S. A Three-Dimensional Linked Segment Model of the Whole Human Body// International Journal of Sport and Health Science. – 2005. – No.3 Special Issue. – 311 – 325 pp.
77. Osbeck J.S., Maiorka S.N., Rundell K.W. Validity of Field Testing to Bobsled Start Performance// Journal of Strength and Conditioning Research. – 1996. – No.10 (4). – 239 – 245 pp.
78. Otten E. Balancing on a narrow ridge: biomechanics and control// Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 1999. – No.354. – 869 – 875 pp.
79. Payton C.J. Motion Analysis Using Video. In Payton C.J., Bartlett R.M., eds. Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise. – Abingdon: Routledge, 2008. – 8 – 32 pp.
80. Platzer H.-P., Raschner C., Patterson C. Performance-determining physiological factors in the luge start// Journal of Sports Sciences. – 2009. – No. 27/3. – 221 – 226 pp.
81. Pernpeintner A., Winkler A. Lessons Learned from the Aerodynamic Shape Development Process of a Bobsleigh// Procedia Engineering – 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA) – 2010 – No. 2. – 2407 – 2412 pp.
82. Reinschmidt C., van den Bogert A.J., Lundberg A., Nigg B.M., Murphy N., Stacoff A., Stano A. Tibiofemoral and tibioalcaneal motion during walking: external vs. skeletal markers// Gait & Posture. – 1997. – No.6 (2). – 98 – 109 pp.
83. Roemer K., Kuhlmann C., Milani T.L. Body Angles in Volleyball Spike Investigated by Modelling Methods// Proceedings of XXV International Symposium on Biomechanics in Sports, August 23 – 27, 2007, Ouro Preto, Brazil. – 329 – 332 pp.
84. Rogowski P., Wala M. The Sport of Luge. – New York: The University Press Inc, 1978. – 144 p.
85. Rudņevs J., Mazais J. Mehānismu analīze un sintēze. 1. studiju burtnīca. – Rīga : Rīgas tehniskā universitāte. Ražošanas kvalitātes institūts, 2006. – 65 lpp.
86. Sakurai Y., Maruyama T. Simulation of running impact using a viscoelastic model considering contact phase// Procedia Engineering. – 2010. – No.2. – 3317 – 3322 pp.
87. Salo A., Grimshaw P.N., Viitasalo J.T. Reliability of variables in the kinematic analysis of sprint hurdles// Medicine and Science in Sports and Exercise. – 1997. – No.29 (3). – 383 – 389 pp.
88. Sands W.A., Smith L.S., Kivi D.M., McNeal J.R., Dorman J.C., Stone M.H., Cormie P. Anthropometric and Physical Abilities Profiles: US National Skeleton Team// Sports Biomechanics. – 2005. – No.4/2. – 197 – 214 pp.

89. Shapiro S.S., Wilk M.B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)// *Biometrika*. – 1965. – No.52. – 591 – 611 pp.
90. Sholukha V., Van Sint Jan S., Snoeck O., Salvia P., Moiseev F., Rooze M. Prediction of joint center location by customizable multiple regressions: Application to clavicle, scapula and humerus// *Journal of Biomechanics*. – 2009. – No.42. – 319 – 324 pp.
91. SimMechanics Getting Started Guide, R2011b. – Version 3.2.3. – The Math Works, Inc. – 2011. – 164 p.
92. Siston R.A., Delp S.L. Evaluation of a new algorithm to determine the hip joint center// *Journal of Biomechanics*. – 2006. – No.39. – 125 – 130 pp.
93. Smith R. Application of Mechanical Modeling to Sport Biomechanics// *Proceedings of XXII International Symposium on Biomechanics in Sports*, August 8 – 12, 2004, Ottawa, Canada. – 563 – 566 pp
94. Smith R.M., Lochner C. Biomechanics feedback for rowing// *Journal of Sports Sciences* – 2002. – No.20. – 783 – 791 pp.
95. Smith S.L., Kivi D., Camus H., Pickels R., Sands W.A. Kinematic Analysis of Men Bobsled Push Starts// *Proceedings of XXIV International Symposium on Biomechanics in Sports*, July 14 – 18, 2006, Salzburg, Austria. – 297 – 300 pp.
96. Statkeviciene B. Influence of Anthropometrical Measurements of Female Athletes in Luge Sport// 3rd Baltic Sports Science Conference, April 29 – May 1, 2010, Riga, Latvia, Book of Abstracts. – 115 – 116 pp.
97. Statkeviciene B. Influence of Anthropometrics Measurements for Athletes of Luge Sport// 3rd Baltic Sports Science Conference, April 29 – May 1, 2010, Riga, Latvia, Book of Abstracts. – 115 p.
98. Struben P.J. The tibial plateau//*The Journal of Bone and Joint Surgery*. – 1982. – Vol.64-B. – No.3. – 337 – 339 pp.
99. Tank P.W., Gest T.R. *Atlas of Anatomy*. – Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2008. – 406 p.
100. Tranberg R. Analysis of body motions based on skin markers. – Doctoral Thesis. – Sahlgrenska Academy at the University of Gothenburg. – Göteborg: University of Gothenburg, 2010. – 70 p.
101. Valeinis J. Ievads darbam ar statistikas paketi R. – Rīga: Latvijas Universitāte. Fizikas un matemātikas fakultāte, 2008. – 47 lpp.

102. Voronov A.V., Lavrovsky E.K., Zatsiorsky V.M. Modelling of Rational Variants of the Speed-Skating Technique// Journal of Sports Sciences. – 1995. – No.13(2). – 153 – 170 pp.
103. Weinhandl J.T., O'Connor K.M. Assessment of a greater-trochanter based method of locating the hip joint center// Journal of Biomechanics. – 2010. – No.43. – 2633 – 2636 pp.
104. Winkler A., Pernpeintner A. Automated Aerodynamic Optimization of the Position and Posture of a Bobsleigh Crew// Procedia Engineering – 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA) – 2010 – No. 2. – 2399 – 2405 pp.
105. Woltring H.J. On optimal smoothing and derivative estimation from noisy displacement data in biomechanics// Human Movement science. – 1985. – No.4. – 229 – 245 pp.
106. Wood G.A. Data smoothing and differentiation procedures in biomechanics// Exercise and Sport Sciences Reviews. – 1982. – No.10. – 308 – 362 pp.
107. Wood S.N. Modelling and smoothing parameter estimation with multiple quadratic penalties// Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). – 2000. – No.62., part 2. – 413 – 428 pp.
108. Wu G., Siegler S., Allard P., Kirtley C., Leardini A., Rosenbaum D., ... Stokes I. ISB Recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion – part I: ankle, hip, and spine// Journal of Biomechanics. – Letter to the Editor. – 2002. – No.35. – 543 – 548 pp.
109. Wu G., van der Helm F.C.T., Veeger H.E.J., Makhsous M., Van Roy P., Anglin C., ... Buchholz B. ISB Recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion – part II: shoulder, elbow, wrist, and hand// Journal of Biomechanics. – Letter to the Editor. – 2005. – No.38. – 981 – 992 pp.
110. Yeadon M.R. Computer Simulation in Sports Biomechanics// Proceedings of XVI International Symposium on Biomechanics in Sports, July 21 – 25, 1998, Konstanz, Germany – 309 – 318 pp.
111. Yeadon M.R., King M.A. Biomechanical simulation models of sports activities. In Hong Y., Bartlett R., eds. Handbook of Biomechanics and Human Movement Science. – Abingdon: Routledge, 2008. – 367 – 379 pp.
112. Yeadon M.R., King M.A. Computer simulation modelling in sport. In Payton C.J., Bartlett R.M., eds. Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise. – Abingdon: Routledge, 2008. – 176 – 205 pp.

113. Zanoletti C., Torre La, A., Merati G., Rampinini E., Impellizzeri F.M. Relationship between Push Phase and Final Race Time in Skeleton Performance// The Journal of Strength & Conditioning Research. – 2006. – No.20/3. – 579 – 583 pp.
114. Zatsiorsky V.M. Kinematics of Human Motion. – Champaign: Human Kinetics, 1998. – 420 p.
115. Zatsiorsky V.M. Kinetics of Human Motion. – Champaign: Human Kinetics, 2002. – 654 p.
116. Zatsiorsky V.M., Raitsin L.M., Seluyanov V.N., Aruin A.S., Prilutzky A.J. Biomechanical characteristics of the human body. In Baumann W., ed. Biomechanics and performance in sport. – Bundesinstitut für Sportwissenschaft, Germany, 1983. – 71 – 83 pp.
117. Zatsiorsky V., Seluyanov V. Estimation of the Mass and Inertia Characteristics of the Human Body by Means of the Best Predictive Regression Equations. In Winter D. et al., eds. Biomechanics IX-B. – Champaign: Human Kinetics, 1985. – 233 – 239 pp.
118. Zatsiorsky V., Seluyanov V. The Mass and Inertia Characteristics of the Main Segments of the Human Body. In Matsui H., Kobayashi K., eds. Biomechanics VIII-B. – Champaign: Human Kinetics, 1983. – 1152 – 1159 pp.
119. Zatsiorsky V., Seluyanov V., Chugunova L. In Vivo Body Segment Inertial Parameters Determination Using a Gamma-Scanner Method. In Berme N., Cappozzo A., eds. Biomechanics of Human Movement: Application in Rehabilitation, Sports and Ergonomics. – Worthington: Bertec Corporation, 1990. – 186 – 202 pp.
120. Аруин А.С., Зациорский В.М. Эргономическая биомеханика. – Москва: Машиностроение, 1989. – 256 с.
121. Бернштейн Н.А. О ловкости и её развитии. Публикация подготовлена профессором И.М. Фейгенбергом. – Москва: Физкультура и спорт, 1991. – 288 с.
122. Бранец В.Н., Шмыгловский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела. – Москва: Наука, 1973. – 320 с.
123. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. – пер. с немецкого Большев Л.Н. – Москва: Издательство Иностранной литературы, 1960. – 435 с.
124. Донской Д.Д., Зациорский В.М. Биомеханика. Учебник для институтов физической культуры. – Москва: Физкультура и спорт, 1979. – 264 с.
125. Зациорский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.Н. Биомеханика двигательного аппарата человека. – Москва: Физкультура и спорт, 1981. – 144 с.

126. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
127. Коренев Г.В. Введение в механику человека. – Москва: Наука, 1977. – 264 с.
128. Михнович В. Исследование влияния реципрокных экзоскелетонных систем с кинематической взаимозависимостью на пациентов с дефицитом мышечной активности. – Диссертация. – Рижский технический университет. – Рига: РТУ, 2006. – UDK 616-009.1-089.23(043), 176 с.
129. Неттер Ф. Атлас анатомии человека. Учебное пособие. Под ред. Бартош Н.О. Перевод с английского Киясов А.П. – Москва: ГЭОТАР-МЕД, 2003. – 600 с.
130. Руководство пользователя по базовой системе Statistics 20. – IBM Corporation. – 2011. – 475 с.
131. Уткин В.Л. Биомеханика физических упражнений: Учебное пособие для студентов факультетов физического воспитания педагогических институтов и для институтов физической культуры. – Москва: Просвещение, 1989. – 210 с.
132. Федотова В.А., Пилипив В.М. Наглядное представление данных в мультимедийных методических пособиях для спортсменов и тренеров.// Материалы Международной научно-практической конференции Информационное пространство современной науки. – 10 декабря 2009 г. – Чебоксары, Российская Федерация – 171 – 174 с.
133. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. – Москва: Госстатиздат, 1958. – 267 с.
134. Basler Vision Technologies – Industrial Cameras – A602fc / Internets. – <http://www.baslerweb.com/products/A600.html?model=315#>
135. Bosh – Power Tools – Intelligent Measuring Tools / Internets. – <http://www.bosch-pt.com/productspecials/professional/dle-150-connect/en/merkmale/index.htm>
136. Brower Timing Systems / Internets. – <http://www.browertiming.com/>
137. Data Translation – Digital I/O USB DAQ Modules / Internets. – <http://www.datatranslation.com/products/usb-digital-io/>
138. DeLock–Products–ExpressCard/Internets.– http://www.delock.com/produkte/gruppen/Express-Card/Delock_Express_Card_2_x_FireWire_A_61387.html
139. Fédération Internationale de Bobsleigh et de Tobogganing / Internets. – <http://www.fibt.com>
140. Fédération Internationale de Luge de Course (FIL) / Internets. – <http://www.fil-luge.org>

141. IOI Technology Corporation / Internets. – <http://www.ioi.com.tw/>
142. Canadian Olympic Team / Internets. – <http://www.olympic.ca>
143. Kwon Y.-H. Theories and Practices of Motion Analysis / Internets. – <http://www.kwon3d.com/theories.html>
144. Latvijas Republikas Sporta likums: 2009. g. 01. augusts / Internets. – <http://www.likumi.lv/doc.php?id=68294>
145. Latvijas Zinātņu Akadēmijas Terminoloģijas komisijas Akadēmiskā terminu datu bāze AkadTerm / Internets. – <http://termini.lza.lv/term.php>
146. Simi Reality Motion Systems GmbH / Internets. – <http://www.simi.com>
147. Vicon Motion Systems. Applications / Internets. – <http://www.vicon.com/applications/>

PIELIKUMI