

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

Veronika FEDOTOVA

Doktora studiju programmas „Biomateriāli un biomehānika” doktorante

SLĒGTĀS KINEMĀTISKĀS ĶĒDES ANALĪZE
SPORTISTU STARTAM KAMANIŅU-BOBSLEJA
TRASĒ

Promocijas darba kopsavilkums

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

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

Rīga 2012

DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

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. [4]

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 sliedēm 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.

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., Pilipiv V. Simplified Planar Kinematic Chain Model of Initial Start Phases in Luging. Abstracts of the 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium; July 4-7th, 2012, 561.
2. Fedotova V., Pilipiv V. Power Production during the Initial Phases in Luging: a Preliminary Study. Abstracts of the 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium; July 4-7th, 2012, 340.
3. Fedotova V., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. 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., Pilipivs V. Variability of Timing Parameters of Starts Performed by Lugers with Different Competitive Experience. Scientific Materials, 2011, 13, 419–427.
6. Fedotova V., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. Timing Rhythm in Female Lugers’ Starts. Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis, 2011, 16(supplement), 80.

9. Fedotova V., Pilipiv V. Comparison of Bobsleigh Performance at St. Moritz Track. *Acta Kinesiologicalae Universitatis Tartuensis*, 2011, 16(supplement), 79-80.
10. Fedotova V., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. Biomechanical Patterns of Starting Technique during Training and Competitive Events for Junior Lugers. *IFMBE Proceedings*, 2010, 31, 282–285.
15. Федотова В.А., Пилипів В.М. 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., Пилипів В.М. 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., Pilipiv V. 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., Pilipiv V. Simplified Planar Kinematic Chain Model of Initial Start Phases in Lugging. The 17th annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Bruges, Belgium, July 4-7th, 2012. Abstract book page No. 561.
2. Fedotova V., Pilipiv V. Power Production during the Initial Phases in Lugging: 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. 340.
3. Fedotova V., 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., 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., Pilipivs 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., Pilipiv V. Comparison of lugers’ 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., Pilipiv V. Timing Rhythm in Female Lugers’ Starts. The 4th Baltic Sport Science Conference, Tartu, Estonia, April 7-9th, 2011.
8. Fedotova V., 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., Pilipivs V. Variability of Timing Parameters of Starts Performed by Lugers 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., Pilipiv V. Timing characteristics of female lugers’ 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., Pilipivs V. Biomechanical Patterns of Starting Technique during Training and Competitive Events for Junior Lugers. The 6th World Biomechanics Congress, Singapore, August 2-6th, 2010. Abstract book page No. 88.
12. Федотова В.А., 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., 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., Pilipiv V. Preparing Video-Based Teaching Aids for Elite Athletes: Software Choice. V Starptautiskā jauno zinātnieku konference, Rīga, Latvija, 2009. gada 2. decembris.

LITERATŪRAS APSKATS

Promocijas darba literatūras apskats iekļauj četras nodaļas. Pirmā nodaļā sniegts bobsleja, skeletoņa un kamaniņu sporta („slīdēšanas” sporta veidu) vispārīgs raksturojums, atspoguļots tekošais pētniecības stāvoklis šajos sporta veidos, apkopoti pētījumu rezultāti pēc pieejamās zinātniskās literatūras (laika periods no 1978. līdz 2011. gadam). Kamaniņu sportam, kas izceļas ar īpatnēju starta izpildi sēdus pozīcijā, detalizēti aprakstīta starta izpildes tehnika. Otrā nodaļa veltīta kinemātisko ķēžu jēdzienam sporta biomehānikā. Trešā nodaļā apskatīts optoelektroniskās kustību analīzes metodes pielietojums sporta biomehānikā; šī metode parasti tiek izmantota kinemātisko rādītāju novērtēšanai. Nodaļa iekļauj informāciju par punktu telpisko koordinātu rekonstrukcijas procedūru no videoierakstiem. Ceturtā nodaļa veltīta sporta kustību datora modelēšanai un ķermeņa masu ģeometrijas noteikšanas metodēm sporta biomehānikā. Datora modelēšanas galvenie uzdevumi ir tiešā un apgriezta dinamikas uzdevuma risināšana, kustības vizualizēšana un optimizēšana. Kinemātiskie modeļi bieži kalpo par sākuma punktu spēku un momentu noteikšanas uzdevuma atrisināšanā.

Kopējais pētījumu rezultātu secinājums ir, ka visos „slīdēšanas” sporta veidos labs starta laiks ir nepieciešamais priekšnosacījums teicama rezultāta sasniegšanai finišā. [1, 6] Starta laika uzlabošana ir šķietami perspektīvs ceļš kopējā rezultāta celšanai visos „slīdēšanas” sporta veidos. Pat neliela startā iegūtā priekšrocība var palīdzēt sportistam ievietoties augstākā pozīcijā finišā. Skeletoņā un bobslejā starta izpilde līdzinās sprinta skrējienam. Pēc Sands un kol. datiem augstākās klases sportisti skeletoņa startā var sasniegt 70 līdz 85% no sava ātruma parastajā 30 m sprintā. Šajos sporta veidos tas lielā mērā arī nosaka starta pilnveidošanas treniņu raksturu. [5] Kamaniņu starta specifikas dēļ to ir grūti salīdzināt ar kādu citu, labāk izpētītu sporta veidu, bet paša sporta veida zinātniskā bāze ir nepilnīga. Zināms, ka sākotnējās starta fāzes spēlē noteicošu lomu laba starta laika sasniegšanā, bet citi starta biomehāniskie aspekti praktiski nav atspoguļoti literatūrā. [2, 4] No sportiskās kustības pilnveidošanas viedokļa interese rada starta izpildē notiekošo kinemātisko, bet perspektīvā arī dināmisko, procesu analīze un izprašana. Datora modelēšana ir viena no piemērotākām mūsdienu metodēm šo uzdevumu realizācijai.

EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Galvenās darbā izmantotās metodes ir datorizētā kustību analīze un datora modelēšana.

Darba gaitā izmantotās specializētās iekārtas un programmatūra:

- laika reģistrācijai starta estakādē izmantots lāzera hronometru komplekts Brower un digitālais fotoaparāts Casio EX-FH20 ar ātrgaitas videoieraksta funkciju (210 kadri sekundē);
- kustību analīzes metode realizēta izmantojot iekārtu kompleksu Simi Motion ar datora programmatūru;
- kustību videoierakstu reģistrācijai izmantotas divas ātrgaitas videokameras Basler A602fc, viena digitālā videokamera Sony DCR-HC96E ar platleņķa objektīvu Sony VCL-HA07A;
- kameru kalibrēšanai ar standarta metodiku izmantota Simi Motion lāzera kalibrēšanas sistēma;
- starta estakādes datora modeļa izveidei nepieciešamo videoierakstu reģistrācijai papildus izmantotas digitālās videokameras Samsung VP-D102D, Sony HDR_XR350VE un Panasonic HDC-TM700K;
- kinemātiskā datormodeļa izstrādei izmantota programmatūras Simulink SimMechanics modelēšanas vide;
- estakādes modeļa un vizualizēšanas modeļa konstruēšanai izmantota programmatūra Autodesk 3ds Max.

Videokameru kalibrēšana

Starts kamaniņu sportā ir sarežģīta kustība, un sportista ķermeņa segmenti virzās vairākās plaknēs vienlaicīgi, tāpēc plakaniskās locītavu koordinātes nav pietiekošas ķermeņa segmentu kinemātikas novērtēšanai. Telpisku koordinātu rekonstrukcija no videoierakstiem iespējama tikai tad, ja ir veikta videokameru kalibrēšana 3D aprēķiniem.

Standarta kameru kalibrēšanas procedūra šajā darbā izpildīta saskaņā ar kustību analīzes sistēmas Simi Motion ražotāja prasībām. Šī procedūra sastāv no divām galvenām daļām: testa objekta videoreģistrācijas un iegūto kalibrēšanas videoierakstu apstrādes Simi Motion programmatūras 3D kalibrēšanas modulī.

Testa objektu (1. att. (a)) filmē vairākās pozīcijās starta estakādē.



(a)



(b)

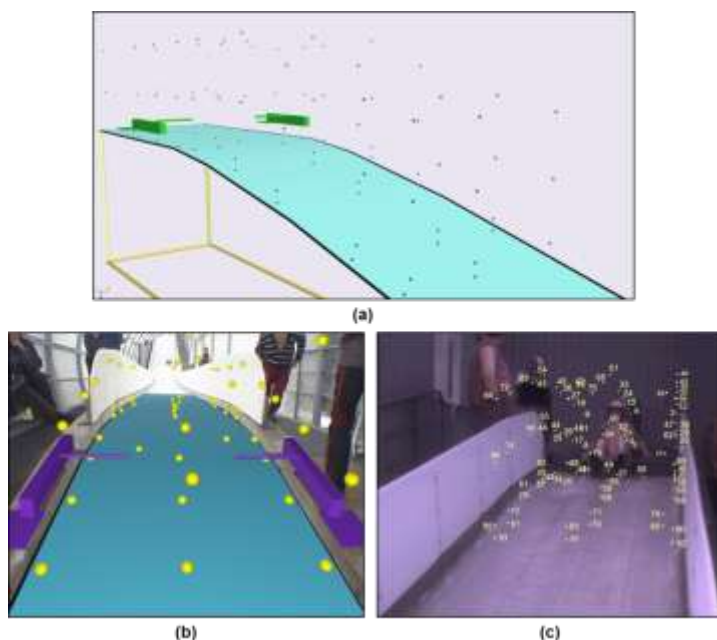
1. att. Kalibrēšanas testa objekts (a) un testa objekta pozīciju kartēšana videoierakstā (b)

Videoieraksti jāreģistrē sinhroni ar visām kustības reģistrēšanai paredzētām kamerām un jānodrošina ne mazāk kā četras testa objekta pozīcijas. Katrā pozīcijā ar tālmēru un leņķa sensoru nosaka testa objekta izvietojuma parametrus, kurus reģistrē protokolā. Starta estakādes nelīdzenajā virsmā grūtības sagādā nodrošināt, lai attālums no ledus pārklājuma līdz testa objekta apakšējam marķierim būtu nemainīgs visās pozīcijās. Kalibrēšanas videoierakstam jābūt nepārtrauktam, un rezultējošās datnes apjoms no katras ātrgaitas kameras var pārsniegt 10Gb, kas ilgtermiņā padara datu uzglabāšanu problemātisku.

Balstoties uz kalibrēšanas protokola datiem, Simi Motion 3D kalibrēšanas modulī iegūst testa objekta marķieru telpisku koordinātu matricu. Tad katrā videoierakstā marķieru pozīcijas kartē, piesaistot tām aprēķināto koordinātu vērtības (1. att. (b)). Šo informāciju izmanto kameru kalibrēšanas parametru aprēķina algoritmā. Iegūtos parametrus automātiski piesaista visiem sportistu kustības videoierakstiem, kas iegūti ar attiecīgo kameru. Kombinējot viena starta mēģinājuma sinhronus ierakstus no vairākām kalibrētām videokamerām, iespējams iegūt interesējošo punktu telpisko koordinātu vērtības.

Lai padarītu kalibrēšanas procedūru efektīvāku, izveidota jauna metodika, kas izslēdz kalibrēšanas videoierakstu reģistrāciju. Metodika balstās uz starta estakādes datora modeļa izmantošanas.

No vairākām estakādes projekcijām (iegūtām no videoierakstiem) un estakādes gabarītu mērījumiem Autodesk 3ds Max programmatūrā rekonstruēts telpisks estakādes datormodelis. Modelī konstruēti sfēriski objekti ar zināmām centru koordinātēm; šie objekti imitē testa objekta marķierus (2. att. (a)). Izstrādātā kalibrēšanas procedūrā kalibrēšanas videoierakstu vietā izmanto sportistu kustību videoierakstus pārklātus ar atbilstošām estakādes datormodeļa projekcijām kopā ar modeli izvietotām marķieru imitācijām (2. att. (b) un (c)). Precīzu videoieraksta un modeļa sakrišanu vieglāk panākt, ja ir zināmas kameru izvietojanas koordinātes (ar precizitāti līdz dažiem centimetriem). Kustības videoieraksts kopā ar „virtuālo marķieru” mākonī, saglabāts kā vienota videodatne, tiek apstrādāts Simi Motion 3D kalibrēšanas modulī tāpat kā kalibrēšanas videoieraksts standarta procedūrā – kadru sekvencē kartē „virtuālos marķierus” un piesaista tiem jau zināmās koordinātes.

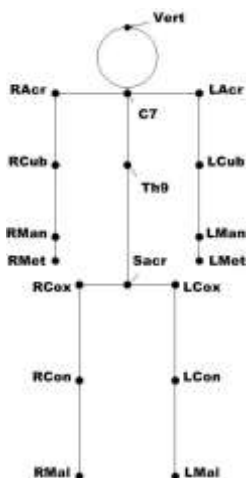


2. att. Starta estakādes modelis ar marķierus imitējošām sfērām (a), videoieraksts pārklāts ar estakādes modeli (b) un kalibrēšanai gatavs videoieraksta kadrs ar „marķieriem” (c)

Jaunā kalibrēšanas metodika atceļ nepieciešamību reģistrēt kalibrēšanas videoierakstus, kas praksē būtiski atvieglo kustību analīzes realizāciju. Datorapstrādes procedūra nemainās, bet tiek papildināta ar projekciju savietošanas operāciju.

Kustību analīze

Kustību analīzes galvenais uzdevums ir iegūt sportista ķermeņa orientieru (locītavu) kinemātiskos rādītājus tālākai to izmantošanai kinemātiskā datormodeļa izveidē. Kustību analīzes procedūra paredz starta mēģinājumu sinhronu videoierakstu reģistrāciju ar vairākām kamerām un šo videoierakstu apstrādi Simi Motion programmatūrā. Interesējošo punktu telpisko koordinātu iegūšanai punktus katrā kadrā vismaz divos sinhronos videoierakstos, kuriem iepriekš piesaistīti kalibrēšanas parametri. Lai aprakstītu kamanīņu starta kinemātiku, videoierakstos kartēti sekojoši punkti: galvas virsa (vertex-Vert), plecu locītavas (acromion-Acr), elkoņu locītavas (epicondylus lateralis-Cub), plaukstu locītavas (processus styloideus ulnae-Man), gūžas locītavas (articulatio coxae-Cox), ceļa locītavas (condylus lateralis-Con) un potītes locītavas (malleolus lateralis-Mal), kā arī septītais kakla skriemelis (vertebra prominens, C7) –3. att. Kamanu kustības aprakstam izmantots papildus punkts (punkts SLb) kamanu kreisās slieces centrā.



3. att. Modelēšanā izmantoto punktu izvietojums

Punkti RMet, LMet (labais un kreisais delna kauls), Sacr (krustu kauls) un Th9 (9. krūšu skriemelis) kustību analīzes programmā netika kartēti, bet izmantoti kā papildus savienojumi kinemātiskās ķēdes modelī.

Koordinātu aprēķina precizitāte pēc nogludināšanas ar splainu metodi novērtējama kā $\pm 0,02$ m.

Datora modelēšana

Cilvēka ķermeņa datormodelis izstrādās pamatojoties uz de Leva modificētā Zatsiorsky un kol. cilvēka masu ģeometrijas modeļa. [3] Segmentu lokālās koordinātu sistēmas izvēlētas saskaņā ar šo masu ģeometrijas modeli. Modelis izstrādāts vienam sportistam, izmantojot individuālos antropometriskos rādītājus un kustību analīzes rezultātus. Pieņemumu pārbaudes par nepieciešamo brīvības pakāpju skaitu izdarītas uz visu 8 pētījuma dalībnieku kustību analīzes rezultātiem. Visu pētījuma dalībnieku antropometriskie rādītāji parādīti 1. tabulā (sportisti A un B (juniores) – sievietes, sportisti C (juniori) un D – vīrieši).

1. tabula

Pētījuma dalībnieku antropometriskie rādītāji

Sportists:	A1	A2	B1	B2	C	D1	D2	D3
Svars, kg	86,6	73,1	73,7	69,1	86,8	81,9	89,3	88,7
Augums, m	1,74	1,73	1,75	1,70	1,91	1,84	1,76	1,83
Torsa garums, m	0,56	0,61	0,62	0,53	0,66	0,64	0,61	0,63
Augšstilba garums, m	0,39	0,40	0,41	0,45	0,47	0,40	0,39	0,44
Apakšstilba garums, m	0,41	0,42	0,39	0,33	0,48	0,42	0,40	0,43
Augšdelma garums, m	0,25	0,28	0,26	0,27	0,30	0,27	0,27	0,28
Apakšdelma garums, m	0,24	0,26	0,25	0,23	0,29	0,26	0,26	0,27

tabulā norādīti labās rokas un kājas segmentu garumi, pieņemot ķermeni par simetrisku

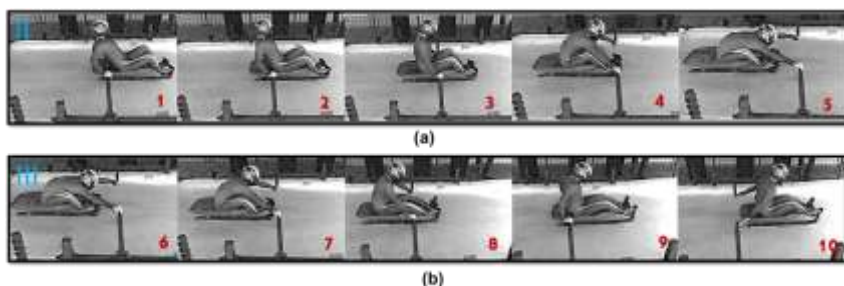
Sportistu ķermeņa segmentu garumi noteikti balstoties uz 3. att. parādītiem robežpunktiem.

Kinemātisko ķēžu analīzei izmantotas mašīnu un mehānismu teorijas metodes.

Šajā darbā izstrādāts sportista ķermeņa modelis divu kamanīņu starta fāžu izpildei, kas pēc literatūras datiem [2] tiek uzskatītas par noteicošām fāzēm starta izpildē:

II fāze – kamanu ieslidināšana uz aizmuguri pirms starta rāvienu („kompresijas” fāze);

III fāze – starta rāvienu fāze (4. att.).



4. att. II (a) un III (b) starta fāzes kinogrammas

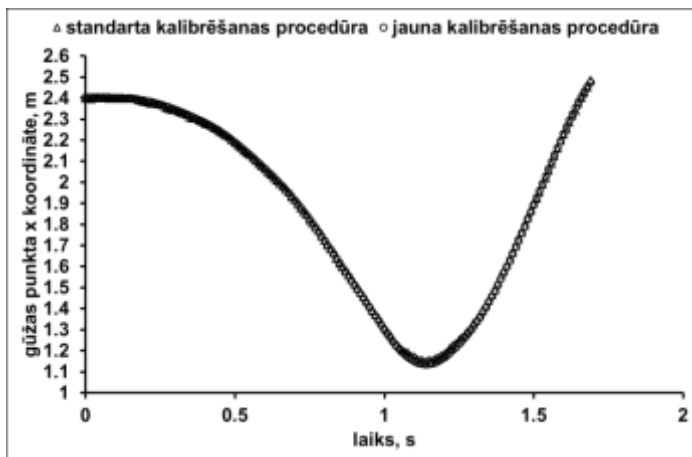
REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

Darba ietvaros izstrādāts kamaniņu starta kinemātiskais datora modelis, kas aptver galvenās starta fāzes, un šo kustību vizualizēšanas datormodelis. Kustību analīzes metodes realizācijas vienkāršošanai sportistu treniņu un sacensību apstākļos izveidota un pārbaudīta jauna kameru kalibrēšanas metodika.

Kalibrēšanas metodikas pārbaude

Metodikas pārbaudei tika salīdzinātas statistiskās testa objektu koordinātes, kas aprēķinātas kustību analīzes programmatūrā pēc jaunās un standarta kalibrēšanas metodiku pielietošanas. Testa objektu gabarītmēri papildus tika salīdzināti ar reālajiem objekta izmēriem. Bez statistiskām koordinātu vērtībām tika salīdzinātas arī no sportista starta mēģinājumu videoierakstiem iegūto koordinātu laika funkcijas.

5. att., 2. un 3. tabulas demonstrē salīdzinājuma rezultātu piemērus. Gan testa objektu statistisko koordinātu salīdzinājums, gan ķermeņa punktu koordinātu laika funkciju salīdzinājums parādīja, ka abas kalibrēšanas metodes sniedz līdzīgas koordinātu vērtības, atšķirība tajās nepārsniedz mērīšanas kļūdu. Iegūtie testa objektu gabarītmēri atbilst objektu reālajiem izmēriem.



5. att. Kalibrēšanas metodiku salīdzinājums – gūžas punkta x koordinātes laika funkcija

2. tabula

Kalibrēšanas metodiku salīdzinājums – punktu koordinātu mērījumi

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. tabula

Kalibrēšanas metodiku 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

tabulās norādītas vidējās mērījumu vērtības ± standartnovirze

Salīdzinājuma rezultāti pierāda, ka izstrādātā metodika ir derīga telpisku koordinātu rekonstrukcijai no videoierakstiem un ļauj iegūt precīzu šo koordinātu novērtējumu. Galvenais metodikas trūkums ir specializētās 3D modelēšanas programmatūras nepieciešamība.

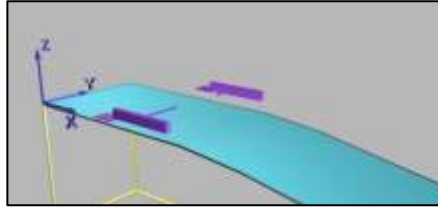
Laika parametru novērtējums

Starta un finiša laika korelācijas analīze (aprēķināts Spīrmena ρ korelācijas koeficients starp starta laiku un laiku, kas atlicis līdz finišam) parādīja, ka Siguldas trasē korelācijas koeficients ir zemāks, nekā dažās citās pasaules trasēs. Siguldas trasē koeficients sastāda 0,48 sieviešu grupā kamaniņu sportā un 0,36 vīriešu grupā (analizēti vairāk nekā 300 mēģinājumi katrā sportistu grupā laika posmā no 2006./2007. līdz 2010./2011. gada sezonai). Salīdzinājumam, Lillehammeres trasē vīriešiem korelācijas koeficients sasniedz 0,74. Sezonas laikā sportisti startē daudzās pasaules trasēs ar atšķirīgu starta un finiša laika savstarpējo sakarību, tāpēc starta izpildes uzlabošana ir viens no prioritāriem treniņu uzdevumiem, it īpaši ārpus trases treniņos.

Starta estakādes treniņu laikā ar hronometriem tika reģistrēti divi laika nogriežņi – pats starta laiks un „augšējais” laiks, ko reģistrē pēc starta rāvienu un pirmās atgrūšanās no ledus. Atkarībā no pēdējā fotoelementu pāra izvietojuma (kas imitē dažāda garuma starta posmus dažādās trasēs), „augšējais” laiks izskaidroja no 38 līdz 74% no pilna starta laika dispersijas vīriešu grupā. Šie dati saskaņojas ar iepriekš publicētiem rezultātiem par sākotnējo starta fāžu svarīgu lomu kopējam starta rezultātam. [2, 4]

Kamaniņu starta datora modelis

Ņemot vērā sākotnējo starta fāžu svarīgumu, datormodelis ir izstrādāts II un III starta fāzēm, kuru izpildes laikā sportista ķermenis un kamanas veido nepārtraukti noslēgto kinemātisko ķēdi – sportista kājas ir atbalstītas pret kamanām un kamanas noslēdz ķēdi ar ledus virsmu, bet sportista plaukstas noslēdz ķēdi caur starta rokturiem. Kustība tiek modelēta no brīža, kad kamanas uzsāk kustību uz aizmuguri (II fāzes sākums), līdz brīdim, kad abas plaukstas atlaiž starta rokturus (III fāzes beigās). Pārejā no II uz III fāzi mainās kamanu kustības virziens. Veidojot datormodeli, references („pasaules”) koordinātu sistēmas asis ir vērstas kā parādīts 6. att. Pēc visu pētījuma dalībnieku kustību analīzes rezultātiem tika noskaidrots, ka kamanas (segments SL) II un III fāzes laikā iziet ārpus horizontālās starta platformas, uz estakādes slīpo daļu, tāpēc kamanu segmenta atļautās brīvības pakāpes modelī ir ne tikai virze gar X asi, bet arī virze gar Z asi un rotācija ap Y asi.



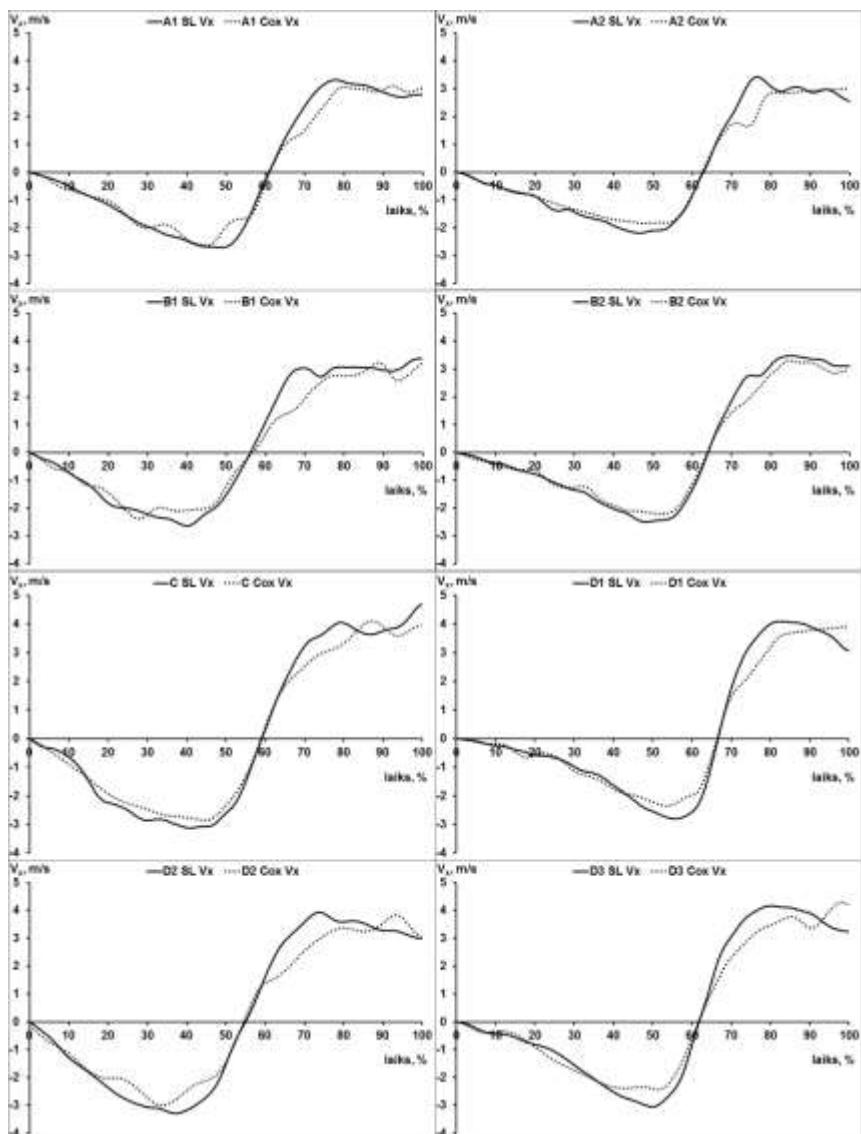
6. att. References koordinātu sistēmas sākumpunkta izvietojums

Kā tika noskaidrots no visu pētījuma dalībnieku kustību analīzes datiem, sportists un kamanas nekustās kā viens vesels, un pastāv gūžas punkta (Cox) pārvietojums relatīvi pret kamanu garenisko asi (7. att.). Punkta Cox relatīvais pārvietojums citos virzienos nav reģistrēts.

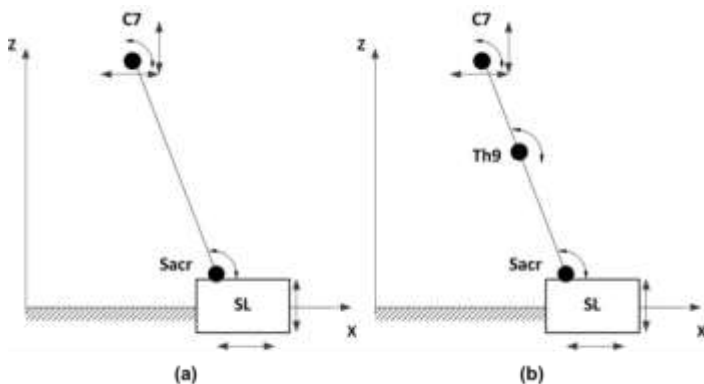
Plakanisks torsa un kamanu segmenta modelis

Analīzes rezultāti liecina, ka torsa un kamanu segmenta kustības var pietiekoši precīzi modelēt plānē, jo nevienam pētījuma dalībniekam nav reģistrētas šo segmentu y koordinātu izmaiņas. Pirmajā tuvinājumā plakaniskā modeļa atbilstības pārbaudei tiek pieņemts, ka kamanu un torsa savienojuma punktā (punkts Cox) torsa segmentam ir iespējama tikai rotācija ap Y asi, bet pārējās kustības šajā punktā tiek izslēgtas, tiek izslēgta arī segmenta SL iespēja rotēt ap Y. Kamanu vertikālais un horizontālais ātrums sakrīt ar punkta Cox ātrumu. Torsa segmentu ierobežo punkti C7 un Sacr, taču plakaniskajā modelī punkta Sacr x un z koordinātes sakrīt ar punktu Cox. Tāda torsa un kamanu modeļa (modelis A) kinemātiskās ķēdes shēma parādīta 8. att. (a).

Kustību imitēšanai ar kinemātisko datora modeli A nepieciešamas trīs vispārinātās koordinātes (un to pirmie divi atvasinājumi pēc laika) – punkta Sacr (Cox) x un z koordinātes un torsa leņķis ar horizontāli. Vispārināto koordinātu vērtības iegūst no kustību analīzes rezultātiem. Kustību imitēšana ar modeli A parādīja, ka tas neatspoguļo sportista kustības starta laikā pietiekoši precīzi – modeļa aprēķinātās punkta C7 koordinātes nesakrīt ar references vērtībām (kustību analīzes rezultātu). Precīzākai kustību atspoguļošanai ir nepieciešams veidot divu segmentu muguras modeli (modelis B, 8. att. (b)). Atļautā brīvības pakāpe starp diviem torsa segmentiem punktā Th9 ir rotācija ap Y asi. Bez iepriekš izmantotām koordinātēm kustību imitēšanai ar modeli B ir nepieciešama vēl viena papildus vispārinātā koordināte – leņķis starp torsa augšējo un apakšējo daļu.



7. att. Kamanu un gūžas horizontālais ātrums II un III starta fāzē aprēķināts vidējais ātrums no 30 veiksmīgiem mēģinājumiem katram pētījuma dalībniekam; laiks normalizēts pret II un III starta fāzes kopējo ilgumu



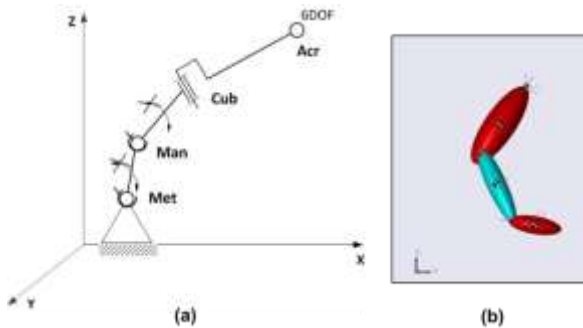
8. att. Modeļa A (a) un B (b) kinemātiskās ķēdes shēma

Lai atbrīvotos no nepieciešamības kustību analīzes programmatūrā kartēt papildus punktu Th9, modelis B tiek modificēts līdz modelim B1 – punktu C7 ar „bezsvara locītavu” savieno ar „iedomājamu statni”, atstājot trīs brīvības pakāpes plaknē. Tas noslēdz atvērtu kinemātisko ķēdi, un kustību imitēšanai datora modelēšanas vidē leņķisko koordinātu vidē var izmantot lineārās punkta Cox un C7 koordinātes. Izstrādātā pieeja nedaudz palielina modeļa shēmas sarežģītību, bet būtiski atvieglo darbu ar vispārinātām koordinātēm, jo izmantotajā modelēšanas vidē lineāro koordinātu interpretācija ir ievērojami vienkāršāka, nekā leņķisko koordinātu interpretācija. Turpmākos modeļos pēc iespējas tika izmantota šī modelēšanas metode – kinemātiskā ķēde tika mākslīgi noslēgta, neizmainot kopējo ķēdes kustīgumu.

Kustību imitēšanā ar modeli B1 tika iegūtas punktu C7 un Cox koordinātes, kas sakrīta ar references vērtībām, tāpēc vienkāršākā gadījumā, kad netiek ņemta vērā SL segmenta rotācija ap Y asi, modelis B1 tika pieņemts par atbilstošu torša un kamanu segmenta modelēšanai.

Telpisks rokas modelis

Lai noskaidrotu nepieciešamo rokas modeļa segmentu skaitu un to savienojuma veidus, tika izveidoti atsevišķi rokas modeļi. Kustības imitēšanas rezultāti parādīja, ka divu segmentu modelis (kas sastāv no augšdelma un apakšdelma segmentiem) neatspoguļo rokas kinemātiku pietiekoši precīzi. Tāpēc tika izstrādāts trīs segmentu rokas modelis, kas sastāv no plaukstas (punkti Met–Man), augšdelma (punkti Man–Cub) un apakšdelma (punkti Cub–Acr) segmentiem.



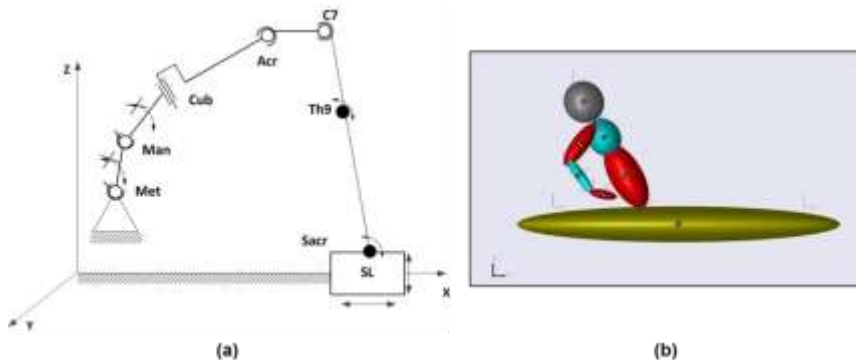
9. att. Rokas modeļa kinemātiskās ķēdes shēma (a) un vizualizēšana datora modelēšanas vidē (b)

Punktā Cub atļautā brīvības pakāpe ir apakšdelma rotācija ap augšdelma segmenta lokālo Y_U asi. Punktā Met plauksta var rotēt ap „pasaules” koordinātu sistēmas Y asi un ap plauksta segmenta lokālo X_H asi.

Plauksta locītavā nepieciešamo brīvības pakāpju skaita pārbaudei tika izveidoti divi plauksta-apakšdelma modeļi. Pārbaudes parādīja, ka viena brīvības pakāpe šajā locītavā nav pietiekoša, un ir nepieciešamas divas brīvības pakāpes – plauksta rotācija ap apakšdelma lokālām X_F un Y_F asīm (9. att.).

Vienpusējs ķermeņa augšējās daļas modelis

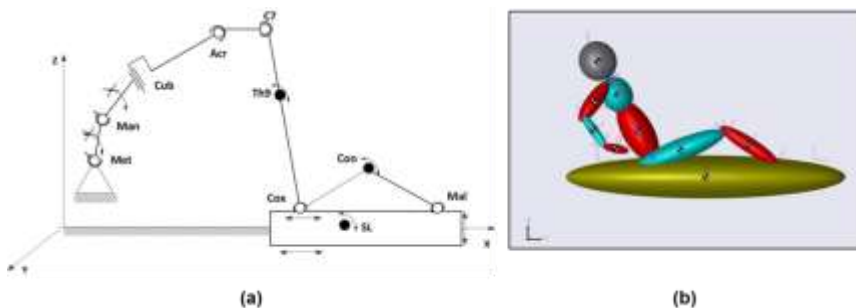
Vienkāršots ķermeņa augšējās daļas modelis (modelis D1) apvieno iepriekš izveidotos modeļus – divu segmentu torša modeli un trīs segmentu rokas modeli (10. att.). Kustību analīzes rezultāti parādīja, ka pleca punkta Acr y koordinātes izmaiņas starta II un III fāzes izpildes laikā pārsniedz mērījuma kļūdu visiem pētījuma dalībniekiem. Tāpēc rokas modeli jāpievieno torša modelim tā, lai savienojums imitētu kustīgu pleca segmentu. Šim nolūkam izmanto datora modelēšanas programmatūrā pieejamo savienojuma veidu – „bezsvara savienotāju”, kas sastāv no diviem lodes šarnīriem, savienotiem savā starpā ar pastāvīga garuma bezsvara stieni. Kustību imitēšanai ar modeli D1 tika izmantotas divas lineārās koordinātes x_{CoX} un z_{CoX} un sešas leņķiskās koordinātes, kuras iegūst no atsevišķiem torša un rokas modeļiem. Kustību imitēšanas rezultāti ar modeli D1 gandrīz pilnībā sakrīt ar references datiem un vizuāli labi atspoguļoja reālās sportista kustības.



10. att. Ķermeņa augšējās daļas modeļa kinemātiskās ķēdes shēma (a) un vizualizēšana datora modelēšanas vidē (b)

Ķermeņa modelis ar kājas segmentiem

Pēdējā modelēšanas stadijā pirms pilna ķermeņa modeļa izveides, iepriekšējais vienusējs modelis D1 tiek papildināts ar kājas augšstilba (Cox-Con) un apakšstilba (Con-Mal) segmentiem un ar iepriekš izslēgtām brīvības pakāpēm – torša virzi gar X_{SL} segmenta asi un segmenta SL rotāciju ap Y asi. Augšstilbs tiek pievienots torša segmentam punktā Cox ar lodes šarnīra savienojumu. Ceļa locītavā (punktā Con) atļautā brīvības pakāpe ir apakšstilba rotācija ap augšstilba lokālo Y_T asi. Punktā Mal apakšstilbs tiek pievienots kamanu segmentam ar lodes šarnīra savienojumu trīskustīgajā kinemātiskajā pāri, tā, lai izslēgtu punkta Man virzes kustības iespējas (11. att.).

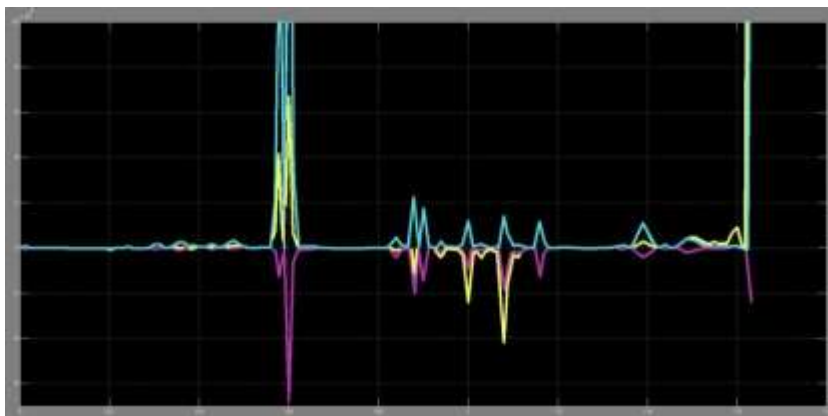


11. att. Pilna ķermeņa modeļa E1 kinemātiskās ķēdes shēma (a) un vizualizēšana datora modelēšanas vidē (b)

Kustības imitēšanai ar šo modeli (modelis E1) tiek izmantotas astoņas vispārinātās koordinātes, kas aprakstītas augstāk, un papildus – punkta SLb x koordināte, punkta Con y koordināte un punkta Mal z koordināte. Punkti Con un Mal tiek pievienoti „iedomājamai statnei”, kā aprakstīts iepriekš, punktā „*Plakanisks torša un kamanu segmenta modelis*”. Kustību imitēšanas rezultāti parādīja, ka izveidotā modeļa E1 aprēķinātās punktu koordinātes ir tuvas references vērtībām. Pievienojot šim modelim simetriskus rokas un kājas segmentus no otras puses, iegūst pilnu ķermeņa modeli II un III starta fāzes imitēšanai.

Spēka noteikšana

Ievietojot pilna ķermeņa datormodeļa shēmā spēka sensorus, ir iespējams noteikt reakcijas spēkus un spēka momentus locītavās. Spēku novērtēšanai tiek izmantoti modelī ievadītie segmentu masas un inerces parametri. Uz starta rokturiem pieliktais spēks ir viens no svarīgākajiem rādītājiem, kas raksturo starta rāvienu. 12. att. demonstrē datora modelēšanas vidē iegūto reakciju spēku grafiku plaukstu un roktura savienojumā. Pašreiz Siguldas starta estakādē un trasē nav iespējams tiešā veidā noteikt reakcijas spēkus starta rokturos, tāpēc references vērtības modeļa aprēķināto rezultātu pārbaudei nav pieejamas. Tomēr iegūtās spēku relatīvās vērtības var izmantot mēģinājumu salīdzinošai analīzei, kas būtiski paplašina starta biomehāniskās analīzes iespējas.

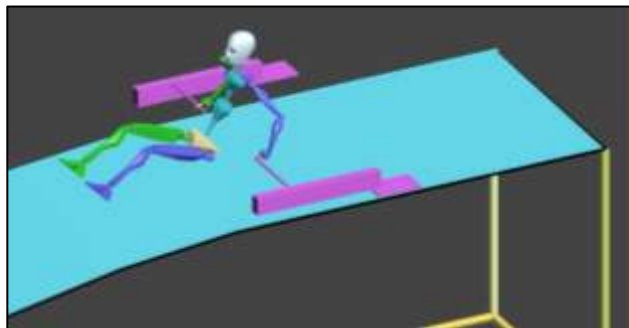


12. att. Reakcijas spēki plaukstu-roktura savienojumā

Spēka X ass komponente – dzeltenā krāsa, Y ass komponente – violetā, Z ass komponente – gaiši zila. Grafikā: abscisas ass–spēks, N, ordinātu ass–laiks, s.

Starta izpildes vizualizēšanas modelis

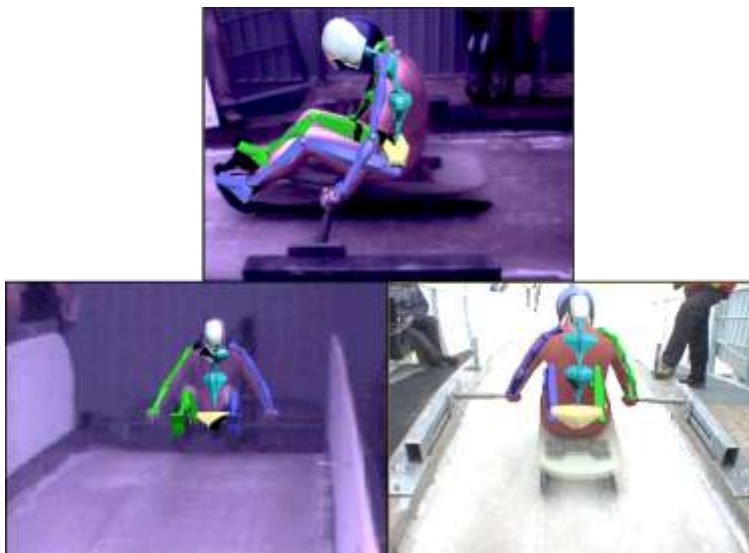
Vizualizēšanas modelis izstrādāts izmantojot 3ds Max programmatūras Character Studio moduļa instrumentu Biped. Modelis sastāv no galvas, viensegmenta kakla, divsegmentu muguras, viensegmenta iegurnā, augšstilbu, apakšstilbu, pēdu, plecu, augšdelmu, apakšdelmu un plaukstu elementiem (13. att.). Vizualizēšanas modeļa segmentu robežas sakrīt ar kinemātiskā modeļa „locītavām”.



13. att. Starta vizualizēšanas modelis

Tika izmantoti instrumenta Biped iebūvētie segmentu kustību ierobežojumi, kas ir pēc iespējas tuvināti reālā cilvēka kustību iespējām un nepieļauj elementu savienojuma pārrāvumus. Muguras, kakla un galvas segmentu kustības papildus tika ierobežotas līdz plakaniskām kustībām XZ plaknē. Pēdu segmenti tika pievienoti modelim estētisko apsverumu dēļ un to kinemātika netika izskatīta. Pēdu segmenta savienojums ar apakšstilba segmentu ir nekustīgs. Arī galva savienota ar kakla segmentu nekustīgi un šo segmentu kopējās kustības nosaka punktu C7 un Vert kinemātika.

Individualizēta modeļa izveidei segmentu garumus nosaka pēc konkrētā sportista antropometriskiem datiem. Līdzīgi kā kinemātiskajā modelī, vizualizēšanas modelī kustību imitēšanai tiek izmantotas punktu koordinātu laika funkcijas, kuras var vai nu pārnest no kustību analīzes programmatūras, vai iegūt no kinemātiskā modeļa. Vizualizēšanas modelis tiek ievietots izstrādātajā estakādes modelī un „kustās” estakādes modeļa koordinātu sistēmā. Sportista segmentu pozīciju attēlošanas precizitāti kustību izpildes laikā var pārbaudīt, savietojot modeļa projekciju ar starta mēģinājuma videoierakstu (14. att.).



14. att. Vizualizēšanas modeļa un videoierakstu savietošana trīs projekcijās

3ds Max programmatūrā ir iespējams noteikt modeļa telpā (estakādē) esošo punktu koordinātes. Tas paplašina izveidotā vizualizēšanas modeļa pielietojamību, ļaujot izmantot modeli sportistu locītavu koordinātu noteikšanai kā alternatīvu kustību analīzes programmatūrai. Savietojot modeli ar sportista ķermeni katrā videoierakstu kadrā, 3ds Max programmatūrā iegūst modeļa punktu koordinātes. Saistīto segmentu modeļa izmantošanas priekšrocība salīdzinājumā ar atsevišķu punktu kartēšanu videoierakstos (kā Simi Motion programmatūrā) ir segmentu pastāvīgā garuma nodrošināšana, kas palielina locītavu koordinātu noteikšanas precizitāti.

Galvenās vizualizēšanas modeļa funkcijas ir sekojošas:

- vizualizēt starta izpildi, izvēloties piemērotāko apskata leņķi, un efektīgi salīdzināt divus vai vairāk starta mēģinājumus (pārklājot divus modeļus vai izvietojot tos blakus);
- vizualizēt teorētiski aprēķināto kustību, kuras kinemātiskie parametri ir zināmi, bet kura netika izpildīta realitātē;
- paaugstināt punktu koordinātu noteikšanas precizitāti no sinhronizētiem videoierakstiem.

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 plauksta 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.

LITERATŪRA

1. 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.
2. Lambert 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. – No.29 (15). – 1593 – 1601 pp.
3. de Leva P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's Segment Inertia Parameters// Journal of Biomechanics. – 1996. – No.29/9. – 1223 – 1230 pp.
4. 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.
5. 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.
6. 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.