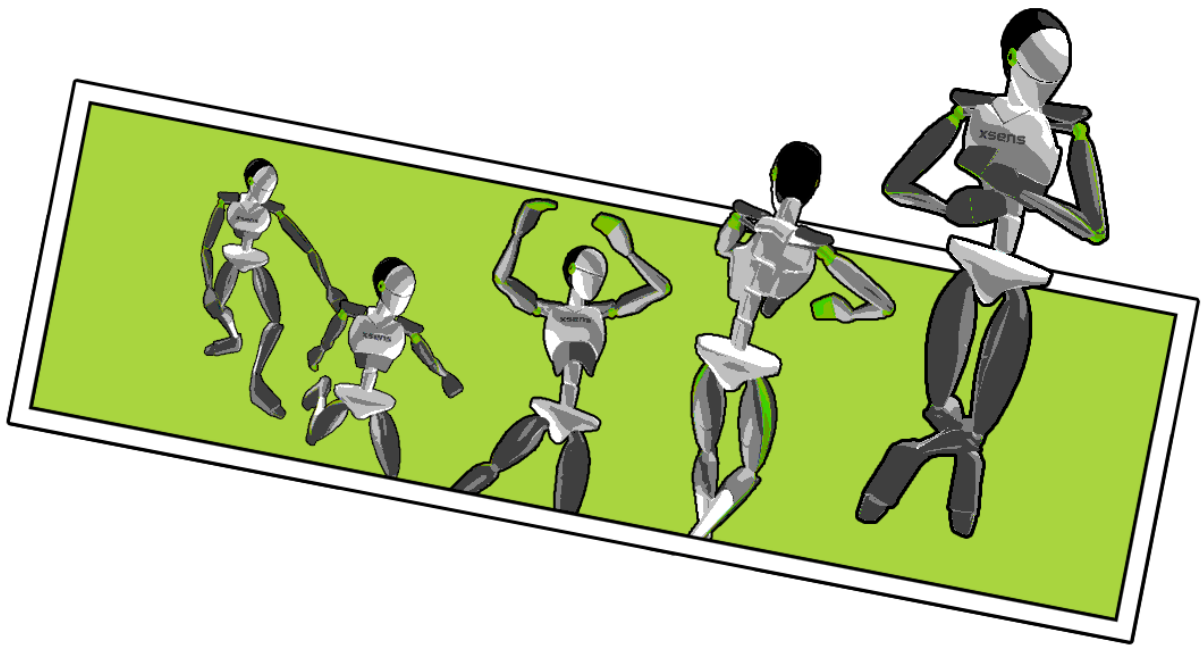




CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Parameterstudie av konståkningens axelhopp

Biomekanisk och dynamisk analys av axelhopp

Kandidatarbete inom Maskinteknik

LOVISA EKBERG
CHARLIE JOHANSSON
HANNA KARLSSON

KANDIDATARBETE 2018

Parameterstudie av konståkningens axelhopp

Biomekanisk och dynamisk analys av axelhopp

LOVISA EKBERG
CHARLIE JOHANSSON
HANNA KARLSSON



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Parameterstudie av konståkningens axelhopp
Biomekanisk och dynamisk analys av axelhopp
LOVISA EKBERG
CHARLIE JOHANSSON
HANNA KARLSSON

© LOVISA EKBERG, 2018.
© CHARLIE JOHANSSON, 2018.
© HANNA KARLSSON, 2018.

Handledare: Magnus Evertsson, Institutionen för Industri- och materialvetenskap
Examinator: Gauti Asbjörnsson, Institutionen för Industri- och materialvetenskap

Kandidatsarbete 2018
Institutionen för Industri- och materialvetenskap
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefonnummer +46 31 772 1000

Framsida: En sekvensiell serie av bilder på en humanoid 3D-modell från programmet Xsens MVN som utför ett axelhopp.

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2018

Parameterstudie av konståkningens axelhopp
Biomekanisk och dynamisk analys av axelhopp
LOVISA EKBERG
CHARLIE JOHANSSON
HANNA KARLSSON
Institutionen för Industri- och materialvetenskap
Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

På grund av det stora antalet skador och de unga utövarana inom konståkning var syftet med projektet att undersöka vilka biomekaniska parametrar som påverkar utfallet av ett axelhopp. Syftet var även att försöka säga något om de krafter som uppkommer under ett hopp.

Genom att använda ett Xsens-system som utnyttjar motion capture-teknologi var det möjligt att spela in åkarnas rörelser under ett axelhopp. Totalt gjordes inspelningar på sex olika utövare med varierande skicklighet och erfarenhet. Datan som genererades från mätningarna användes tillsammans med videoinspelningar av hoppet för att analysera och jämföra olika tekniska parametrar mellan olika åkare och mellan en enskild utövars inbördes hopp.

De tekniska parametrar som jämfördes och analyserades var rotationshastigheter, vinkel i rygg och knä under hoppen, hur medelhastigheterna ser ut under hoppets olika delar och vilka energier som uppstår under ett hopp. Parametrarna resulterade i iakttagelser om ett samband mellan vinkeln i ryggen och max rotations hastigheten. Det observeras även att knät under landning utsätts för två impulsstötter vilket kan ge en större skadepåverkan på åkaren. Det påvisades att det försvinner mer energi vid landningen av dubbelt axelhopp än landningen för ett enkelt axelhopp samt att ingångshastigheterna inte är beroende utav vad för hopp som utförs utan att de är samma för både enkelt- och dubbelt axelhopp.

Parameter study of figure skating's axeljump
Biomechanical and dynamic analysis of axeljump
LOVISA EKBERG
CHARLIE JOHANSSON
HANNA KARLSSON
Institution of Industrial- and materials science
Chalmers university of technology

Abstract

Due to the large amount of injuries and the fact that the majority of the elite skaters are very young, the purpose of the study was to investigate which parameters affect the outcome of an axel jump. The purpose was also to try explain the forces that occurs during the jump.

By using an Xsens-system which enables motion capture-technique, it was possible to record the skaters movement during an axeljump. In total four skaters with different abilities and experiences were studied. The generated data was used together with recorded videos of jumps to analyse and compare different technical parameters between the skaters and also their individual jumps.

The technical parameters that was analysed and used for comparison was angular velocity, angle in the back and knee during the jump, how the mean velocity varies during different sequences of the jump and which energies occurs during the jump. The analyse and comparison resulted in an obvious connection between the angle in the back and the maximum angular velocity. It was observed that the knee during landing is exposed for two impulse shocks, which can increase the risk of injuries of the skater. It was also observed that more energy is lost during the landing of a doubleaxeljump than of a singleaxeljump. The velocity in the beginning of the axeljump does not depend on which jump the skater is performing, it seems to be the same for both single- and doubleaxel.

Förord

Rapporten beskriver studier av konståkningens axelhopp ur ett biomekaniskt perspektiv. Detta är vår kandidatuppsats skriven vid institutionen för Industri- och materialvetenskap på Chalmers tekniska högskola, våren 2018.

Projektgruppen vill tacka alla inblandade som hjälpt oss i vårt arbete. Främst ett tack till våra handledare, Magnus Evertsson som med stort engagemang bidragit med många idéer och viktiga kontakter. Ett stort tack också till Panagiota Papadopoulou för ditt stora stöd och din tid. Utöver dessa personer riktas tack till inblandade utövare, tränare och andra specialister som gjort projektet möjligt med sitt intresse, tid och kunskap.

Lovisa Ekberg, Charlie Johansson och Hanna Karlsson, Göteborg, maj 2018

Ordlista

Adobe After Effects - Programvara för bearbetning och redigering av film.

Avstamp - En del av delmomentet ingången. Åkaren använder höger fot för att trycka upp farten som ska användas under resten av hoppet.

Delmoment - En del av hoppet, i rapporten är dessa delmoment ingången, luftfärden eller landningen.

fps - Frames per second (sv: rutor per sekund), hur snabbt en kamera eller video spelas upp.

Hopp/Hoppet - I rapporten syftar hoppet på ingång, luftfärd och landning.

Ingång - Delmoment innan luftfärden. Den del av hoppet då utövaren med vänster fot glider i en båge och trycker ifrån isen.

Landning - Delmoment efter luftfärden. Definieras från när åkaren får kontakt med isen till avsvängningen en kort stund efter.

Luftfärd - Den delen av hoppet som åkaren inte har kontakt med isen. Definieras från när skridskoskåret lämnar underlaget till dess att det andra skåret får kontakt igen.

Matlab - Beräkningsprogram.

Mocap - Motion-capture (sv: rörelseinspelning).

Xsens MVN - Programvara för inspelning och bearbetning av Motion-capture inspelningar.

Innehåll

Figurer	xiii
Tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Problemformulering	2
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Etiska aspekter	2
2 Teori	4
2.1 Förklaring av axelhoppet	4
2.1.1 Ingång	5
2.1.2 Luftfärd	5
2.1.3 Landning	5
2.2 Energi i axelhoppet	6
2.2.1 Tröghetsmoment	6
2.2.2 Energi i ingången	7
2.2.3 Energi i luftfärden	8
2.2.4 Energi i landningen	10
2.2.5 Förluster	10
2.2.5.1 Friktion	10
2.2.5.2 Luftmotstånd	11
2.3 Tidigare kandidatarbeten	12
3 Metod	13
3.1 Insamling av data	13
3.1.1 Urval av konståkare inför mätningar	14
3.1.2 Datainsamling med Mocap-teknologi	14
3.1.2.1 Beskrivning av Xsens-systemet	14
3.1.2.2 Kalibrering av Xsens-systemet	16
3.1.3 Insamling av videodata	17
3.2 Bearbetning av data	18
3.2.1 Bearbetning av Mocap-data	18
3.2.2 Bearbetning av videodata	19
3.3 Beräkningar och förenklingar	21

3.3.1	Energitermer	21
3.3.1.1	Rörelseenergi	21
3.3.1.2	Rotationsenergi	22
4	Resultat	23
4.1	Rotationshastighet	23
4.1.1	Rotationshastigheter under ett enkelt axelhopp	24
4.1.1.1	Arean under graf för rotationshastighet under enkelt axelhopp	25
4.1.2	Rotationshastigheter under ett dubbelt axelhopp	27
4.1.2.1	Arean under graf för rotationshastighet under ett dubbelt axelhopp	28
4.2	Vinkel i ryggraden relativt höften under hoppet	29
4.2.1	Åkare 1	29
4.2.2	Åkare 2	30
4.2.3	Åkare 3	32
4.2.4	Åkare 4	33
4.3	Vinkel i höger knäled under landning	34
4.3.1	Åkare 1	34
4.3.2	Åkare 2	35
4.3.3	Åkare 3	35
4.3.4	Åkare 4	37
4.3.5	Beräkningsresultat relaterat till hopp höjd och impuls kraft vid landning med avseende på stabiliseringstid	37
4.4	Medelhastigheter under hoppet	39
4.4.1	Åkare 2	40
4.4.2	Åkare 3	40
4.4.3	Åkare 4	41
4.5	Energibalans av rörelseenergi, rotationsenergi och potentiell energi under en åkares hopp	42
5	Diskussion	45
5.1	Metoddiskussion	45
5.1.1	Mätningar	45
5.1.2	Datainsamling och bearbetning med Xsens	45
5.1.3	Datainsamling och bearbetning av video	46
5.1.3.1	Felkällor under uppskattning av tid i videoanalys	46
5.1.3.2	Felkällor under uppskattning av avstånd i videoanalys	46
5.2	Resultatdiskussion	47
5.2.1	Rotationshastigheter	47
5.2.2	Vinkel i ryggraden relativt höften under hoppet	48
5.2.3	Vinkel i höger knäled under landning och impuls kraft	48
5.2.4	Medelhastigheter under hoppet	49
5.2.5	Energibalansen	49
6	Slutsats	51

7	Rekommendationer	52
	Referenser	53
A	Tröghetsmomentsberäkningar	I
B	Matlabkod för tröghetsmoment	IV

Figurer

2.1	Ett axelhopp från ingång till landning.	4
2.2	Hur isskären och åkarens orientering ser ut uppifrån under ett axelhopp.	5
2.3	Energi under ett axelhopp från ingång till landning.	6
2.4	Riktningar på hastigheter och rotationer under ingången av ett axelhopp.	8
2.5	Riktningar på hastigheter och rotationer under luftfärden av ett axelhopp.	9
2.6	Riktningar på hastigheter och rotationer under landning av ett axelhopp.	10
3.1	Mätningar med hjälp av videoinspelning och Xsens-systemet.	13
3.2	Placering av sensorer (orange), batteri (gul) och body-pack (blå).	15
3.3	En åkare under kalibrering av Link-systemet.	16
3.4	Exempel på kamerapositioner och utmarkerat hoppområde på en skridskorink.	17
3.5	De två kamerorna som användes under mätningarna.	18
3.6	Använd "Overlay" för att göra bildlagret genomskinligt (Till vänster) och "Distort" för att skapa ett perspektiv med hjälp av de utsatta punkterna (Till höger).	20
3.7	Exempel på hopplängdsuppskattning.	21
3.8	Hur kroppsdelarna förenklats i beräkningarna av trögheftmoment.	22
4.1	Exempel på graf över rotationshastigheter mot tid i luften under luftfärden av ett axelhopp.	23
4.2	Rotationshastigheter mot tid i luften under luftfärden för enkelaxel och varje åkare, (a) enkelaxel åkare 1, (b) enkelaxel åkare 2, (c) enkelaxel åkare 3, (d) enkelaxel åkare 4	24
4.3	Exempel på rotationshastigheter med ny approximerad kurva. Den blåa kurvan representerar minimat medan den röda representerar den nya approximerade kurvan.	25
4.4	Area under luftfärden av ett enkelt axelhopp samt area för minimat med varierande y-axlar	26
4.5	Area under luftfärden av ett enkelt axelhopp för de åkare utan minima.	27
4.6	Rotationshastigheter mot tid i luften under luftfärden för dubbelaxel och varje åkare, (a) åkare 3, (b) åkare 2.	27
4.7	Area under luftfärden av ett enkelt axelhopp samt area för minimat med varierande y-axlar.	28

4.8	Hur ryggvridningen definieras, en rak hållning definieras som noll grader.	29
4.9	Vridningen i överkroppen för åkare 1 (enkelaxel), alla hopp godkända.	30
4.10	Vridningen i överkroppen för åkare 2 (enkelaxel), alla hopp godkända.	31
4.11	Vridningen i överkroppen för åkare 2 (dubbelaxel), inget hopp godkänt.	31
4.12	Vridningen i överkroppen för åkare 3 (enkelaxel), alla hopp godkända.	32
4.13	Vridningen i överkroppen för åkare 3 (dubbelaxel), delvis godkända hopp. De godkända hoppen illustreras med heldragna linjer medan de icke godkända illustreras med prickiga linjer.	33
4.14	Vridningen i överkroppen för åkare 4 (enkelaxel), alla hopp godkända.	33
4.15	Hur vinkeln i höger knäled under landningen är definierad.	34
4.16	Skillnader i knävinkel för åkare 1 (enkelaxel).	34
4.17	Skillnader i knävinkel för åkare 2 (enkelaxel).	35
4.18	Skillnader i knävinkel för åkare 3 (enkelaxel).	36
4.19	Skillnader i knävinkel för åkare 3 (dubbelaxel).	36
4.20	Skillnader i knävinkel för åkare 4 (enkelaxel).	37
4.21	Var de tre undersökta medelhastigheterna tagits ur hoppen, vy ovanifrån	39
4.22	Skillnader i medelhastighet under hoppets tre olika delmoment för åkare 2 (enkelaxel).	40
4.23	Skillnader i medelhastighet under hoppets tre olika delmoment för åkare 3 (enkel- och dubbelaxel).	41
4.24	Skillnader i medelhastighet under hoppets tre olika delmoment för åkare 4 (enkelaxel).	41
4.25	Rörelseenergi, rotationsenergi och potentiell energi över åtta hopp.	43
4.26	Addition av olika energitermer för åkare 3.	43
4.27	Medelvärde av energisumman i enkelt- och dubbelt axelhopp för åkare 3	44
A.1	Hur kroppsdelarna förenklats i beräkningarna.	I

Tabeller

3.1	Tabell över sensorerna som placeras i helkroppsdräkten. Numren representerar positionen från figuren ovan.	15
3.2	Tabell över segment och leder.	19
3.3	Tabell över variablerna som går att använda i MVN.	19
4.1	Tabell med medeltiden som varje åkare spenderar i luften.	37
4.2	Tabell med medelhöjden som åkaren hoppar och sluthastigheten de har precis innan kontakt med marken.	38
4.3	Tabell med stabiliseringstid och uträknad kraft per kg som åkaren utsätts för vid landning.	38
A.1	Segment och tröghetsmoment	I
A.2	Massfördelning	II
A.3	Kroppsmått	II

1

Inledning

Idag har svensk konståkningen 27 000 medlemmar och är en idrott på framfart. Konståkning är en av de tio sporter i Sverige som växer snabbast [1] och det svenska konståkningsförbundet har tydliga mål och visioner om att konståkning skall bli synligare, starkare, stoltare och om att det är en idrott för alla [2].

1.1 Bakgrund

Konståkning är en idrott som ställer höga krav på utövarna. Det krävs bra koordination, styrka och uthållighet [3]. Det är en tekniskt repetitiv sport där elitutövarna ofta är unga. Konståkning utförs i fyra olika former nämligen singel-, par-, synkroåkning och isdans. I singelåkning tävlar man i två olika program, ett så kallat kort- och ett friåkningsprogram. Båda lägger fokus på hopp, piruetter och stegsekvenser som ställer stora fysiska krav på åkarna.

Under tävling finns det restriktioner för hur åkarens tävlingsprogram skall vara utformat och krav på att specifika hopp skall genomföras [4]. De olika hopp som genomförs har alla en landning som sker baklänges. Däremot skiljer sig ingången åt. Ett utav de svåraste hoppen inom konståkning är axelhoppet, där ingången sker framlänges, vilket gör att åkaren behöver rotera ett halvt varv extra jämfört med hopp med ingång baklänges [5].

Det har tidigare bedrivits en del forskning på konståkning och skadorna som genereras, men till skillnad från många andra idrotter är kunskapen väldigt låg. Flera tränare som varit involverade i projektet vittnar om att sporten inte förlitar sig på vetenskap när det kommer till träningsmetoder eller utförandet av hopp, utan istället på erfarenhet som de själva fått som utövare. Ett exempel på tidigare studier är en undersökning av krafterna som uppkommer vid landningen av ett hopp. Dessa visade sig vara mellan fem och åtta gånger den egna kroppsvikten [6]. Tidigare har två projekt genomförts på Chalmers tekniska högskola, och ambitioner fanns om att förfinas och utveckla de framtagna resultaten ytterligare i detta projekt [7],[8].

Under projektet fanns tillgång till Mocap-teknologi (Motion capture-teknologi) som bland annat används för att återskapa rörelser i animerad film eller i vetenskapliga sammanhang inom sport, medicin och automation [9]. Tekniken ger möjligheter att samla in data som beskriver mänskliga rörelser i detalj för att sedan göra tekniska analyser beräkningar.

1.2 Syfte

Syftet med projektet var att utreda vilka parametrar som spelar en betydande roll vid utförandet av ett axelhopp och försöka säga något om de belastningar som då uppstår. Projektet syftade också till att utreda och beskriva de energitermer som förekommer vid utförandet av ett hopp. Då forskning bedriven på området var begränsad syftade projektet till att utgöra en grund som framtida projekt på området kan utgå från och vidareutveckla. Detta för att på längre sikt kunna utveckla idrotten.

1.3 Problemformulering

Eftersom skadorna i konståkning är många och delvis kan härledas till den repetitiva träningsformen [10] var uppgiften att undersöka vilka parametrar som påverkar utförandet av ett axelhopp. Projektets uppgift var att göra tekniska analyser av axelhoppet och försöka dra slutsatser för hur en åkare kan förbättra sin hoppteknik. Uppgiften var också att undersöka energifördelningen under hoppet för att om möjligt kunna säga något om krafterna som åkaren utsätts för i landningen. Frågor som skulle undersökas och besvaras i arbetet är:

- Vilka parametrar påverkar utfallet av ett enkelt och ett dubbelt axelhopp och skiljer det sig åt mellan åkare?
- Vilka delmoment i ett hopp finns och hur går det att påverka dessa för att lyckas bättre med ett hopp?
- Går det att genom att studera energitermer i hoppet beskriva de krafter som uppkommer i ett hopp?

1.4 Avgränsningar

Projektet studerade endast konståkningsformen singelåkning då det är den gren där flest individuella hopp ingår. I projektet studerades enkla och dubbla axelhopp. Projektet syftade inte till att bedöma de estetiken i utförandet av axelhoppet, utan fokuserade kring de tekniska delarna. Insamling av data skulle i första hand utföras med hjälp av Xsens och motion-capture teknik, för att kunna göra jämförelser med resultat från tidigare projekt samt för att samla in ny mätdata.

1.5 Etiska aspekter

I det berörda ämnet fanns under projektets gång en hel del etiska frågeställningar som aktiva, tränare och andra berörda behövde ta ställning till. Utövarna på elitnivå är unga, exempelvis var två av medaljörerna på damsidan i 2018 års europamesterskap under 18 år gamla [11], året innan var statistiken densamma [12]. Detta faktum i kombination med den höga skaderisken [10] ger utrymme att diskutera huruvida det är rätt att låta ungdomar träna på det sätt och i den mängd som varit vanlig under lång tid. För tränare, föräldrar och utövare blir balansgången mellan fina resultat

och en god fysisk hälsa svår. Det är oklart ifall dessa unga utövare är medvetna över priset de får betala för att bli elitåkare. Enligt Sveriges Riksidrottsförbunds riktlinjer för barn- och ungdomsidrott ska ungdomar som gör en elitsatsning göra detta på ett långsiktigt och hållbart sätt, både fysisk och psykiskt [13].

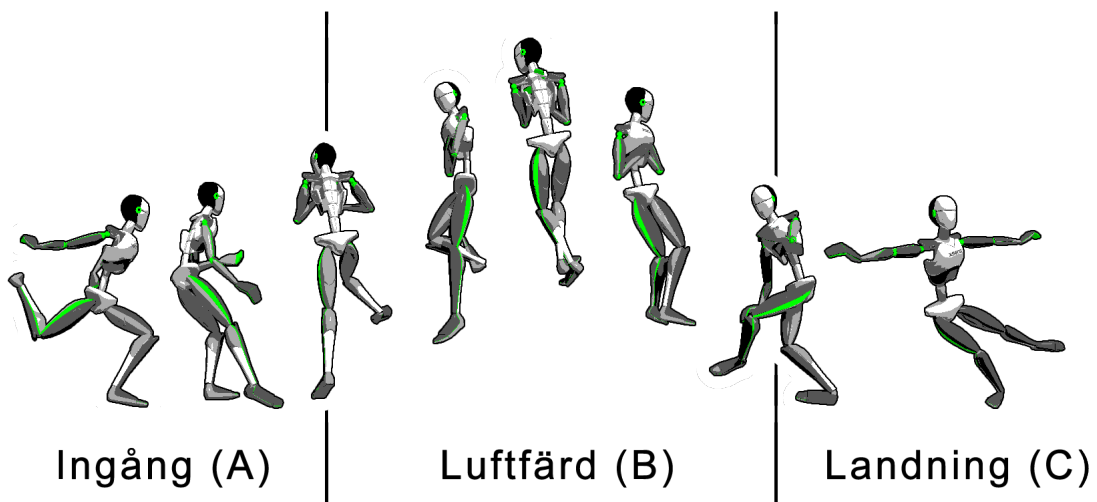
2

Teori

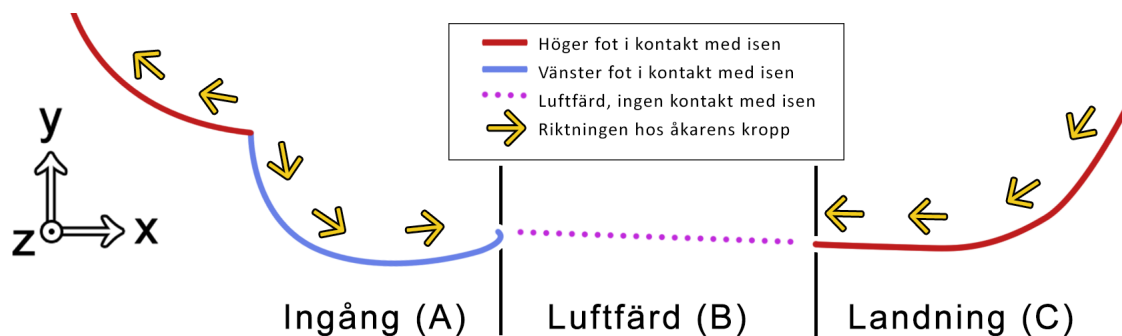
Det här kapitlet beskriver axelhoppet ingående ur ett tekniskt perspektiv. De teorier som används baseras på grundläggande dynamiska och fysiska lagar.

2.1 Förklaring av axelhoppet

Axelhoppet har en ingång framlänges medan landningen sker baklänges. Att ingången sker framlänges skiljer hoppet från övriga hopp, där ingången istället sker baklänges. Detta gör att ett enkelt axelhopp kräver en rotation på 540 grader istället för 360 grader [5]. Ett dubbelt axelhopp kräver då ytterligare 360 grader, det vill säga totalt 900 graders rotation. I figur 2.1 illustreras de olika sekvenserna i ett enkelt axelhopp. Följande avsnitt beskriver de olika sekvenserna ingång, luftfärd och landning mer ingående. Genom hela rapporten kommer dessa tre termer användas enligt definitionen nedan. När termen hopp används refererar den till hela sekvensen. I figur 2.2 illustreras åkarens åkväg under de olika sekvenserna sett ovanifrån.



Figur 2.1: Ett axelhopp från ingång till landning.



Figur 2.2: Hur isskären och åkarens orientering ser ut uppifrån under ett axelhopp.

2.1.1 Ingång

Ett axelhopp är ofta enkelt att skilja från andra typer av hopp. Ingången påbörjas genom att åkaren glider baklänges på höger ben. Därefter vänder sig åkaren framåt och sätter i vänster fot, vilken är upphoppsfoten. Vändningen sker i en båge som gör att åkaren redan innan luftfärden har påbörjat rotationen. Innan åkaren lämnar isen dras armar och högerbenet bakåt för att när åkaren lämnar isen dras framåt och uppåt mot kroppen.

2.1.2 Luftfärd

I luften flyttas armarna in mot kroppen och trycks mot bröstet för att minska tröghetsmomentet och på så vis öka rotationshastigheten. Samtidigt sträcks det ben som tidigare dragits upp mot kroppen ut och benen korsas. Innan landning behöver åkaren få rotationen att avta för att inte falla när skridskonns skär träffar isen igen. För att göra det flyttar åkaren armarna ut från bröstet och upphoppsbenet dras upp mot kroppen. Detta gör att åkarens tröghetsmomentet åter igen ökar och rotationen avtar.

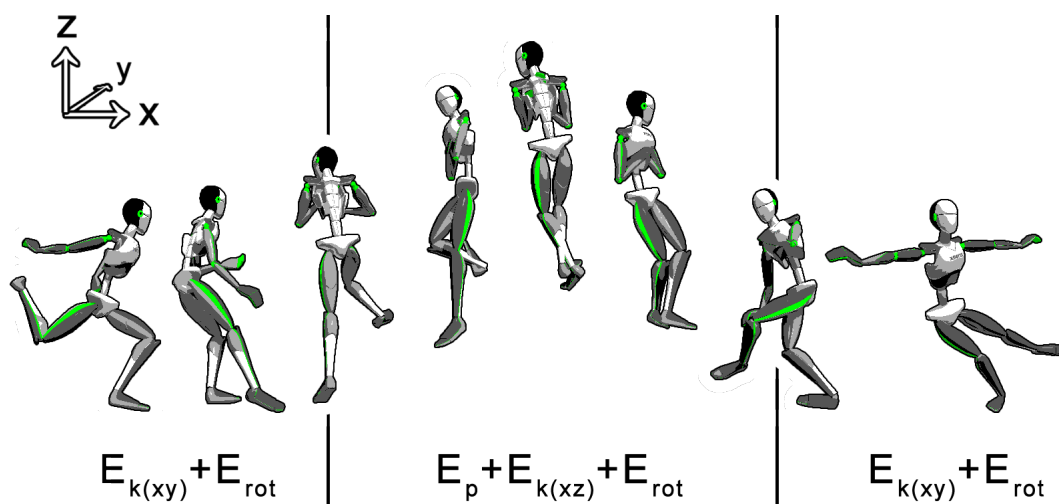
2.1.3 Landning

Landningen av hoppet sker som tidigare nämnts baklänges med höger ben som landningsben. För att dämpa kraften som uppstår vid landning böjs benet och åkaren glider ut i en båge vilket visas i figur 2.2 (c). Det ben som inte är i isen dras bakåt och armarna sträcks ut för att hålla balansen.

2.2 Energi i axelhoppet

Axelhoppet kan även beskrivas i flera steg utifrån fysiska energitermer och ekvationer. Hoppet kan visualiseras genom att konståkaren hoppar längs med en x-axel och uppåt i z-led. I avsnittets beräkningar och beskrivningar försummas förluster såsom friktion och luftmotstånd.

De energier som uppkommer under ett axelhopp kan ses i figur 2.3 och är kinetisk energi i form utav rotationsenergi E_{rot} och rörelseenergi E_k , samt potentiell energi i form utav lägesenergi E_p . Rörelseenergin uppstår i två olika riktningar. I ingången utav hoppet är den riktad horisontellt medan den i luftfärden också får en vertikal komponent längs med z-axeln. Energi tillförs och bortförs även från musklerna vid ingång och landning. Dessa har också inverkan på den totala energisumman.



Figur 2.3: Energi under ett axelhopp från ingång till landning.

2.2.1 Tröghetsmoment

För att kunna beräkna den kinetiska energin på grund av rotation krävs beräkning av tröghetsmoment. Definitionen av tröghetsmomentet följer ekvation 2.1, där r representerar det vinkelräta avståndet för varje masselement till den valda rotationsaxeln. Variabeln M representerar kroppens totala massa [14].

$$I = \int_M r^2 dm \quad (2.1)$$

För rotationen för ett godtyckligt koordinatsystem n beror tröghetsmomentet på kroppens form och massfördelningen kring axeln. Genom att ställa upp tröghetstensor, 2.2 nedan, för godtycklig kropp är det möjligt att beräkna tröghetsmomentet kring en godtycklig axel [15].

$$I_n = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

För att göra beräkningarna för ett annat koordinatsystem m än den som definieras i tröghetstensorn används rotationsmatriser, likt de i ekvation 2.3 till 2.5. Variablerna α , β och γ motsvarar här vinklarna mellan de lokala och globala axlarna [16].

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Den sammanlagda rotationsmatrisen i ett ZYX-system fås sedan enligt ekvation 2.6 [17].

$$R_{tot}(\gamma, \beta, \alpha) = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) \quad (2.6)$$

För att få värden för tröghetstensorn i det nya koordinatsystemet m lyder formeln enligt ekvation 2.7 [15].

$$I_m = R_{tot}(\gamma, \beta, \alpha)I_n R_{tot}(\gamma, \beta, \alpha)^T \quad (2.7)$$

När detta gjorts går det att med Steiners sats [18], ekvation 2.8, beräkna tröghetsmomentet kring de olika axlarna i m -systemet. Här representerar d det vinkelräta avståndet till aktuell axel från den punkt där tröghetstensorn från början är definierad. Variabeln m är kroppens massa.

$$I_{sm} = md^2 = m \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}^2 \quad (2.8)$$

Det totala tröghetsmomentet för en kropp kring en axel, i detta fall x-axeln, i det nya koordinatsystemet m kan därför skrivas enligt ekvation 2.9.

$$I_{tot} = I_m + I_{sm} \quad (2.9)$$

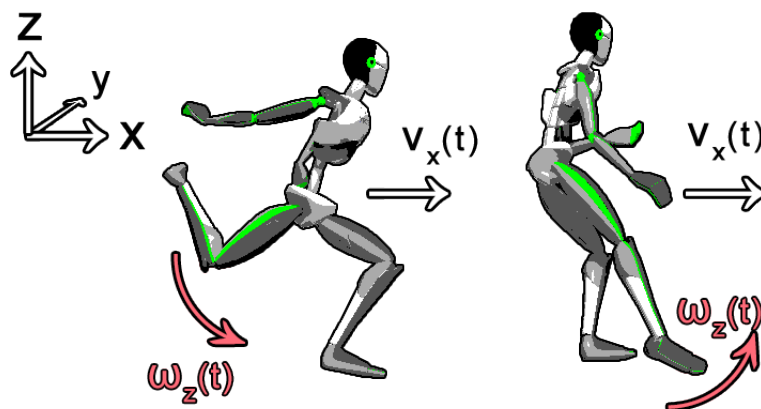
2.2.2 Energi i ingången

Ingången till hoppet kan beskrivas som kinetisk energi i form utav rörelseenergi $E_{k(xy)}$ och rotationsenergi E_{rot} , se figur 2.3. Rörelseenergin är beroende av massan och hastigheten i x-led, se ekvation 2.10, medan rotationsenergin är beroende av rotationshastigheten och åkarens tröghetsmoment, se ekvation 2.11 [19] [20].

$$E_k(t) = \frac{mv^2(t)}{2} \quad (2.10)$$

$$E_{rot}(t) = \frac{I(t)\omega^2(t)}{2} \quad (2.11)$$

Innan skridskon lämnar isen glider åkaren i en båge samtidigt som ett ben sträcks ut vilket bygger upp en rotationshastighet runt konståkarens lokala z-axel relativt den hastighet åkaren har i x-led, se figur 2.4. Innan åkaren lämnar isen behöver åkaren böja på ett ben för att sedan trycka ifrån vilket konverterar kemisk potentiell energi från musklerna till rörelseenergi i z-led för att få höjd till hoppet.



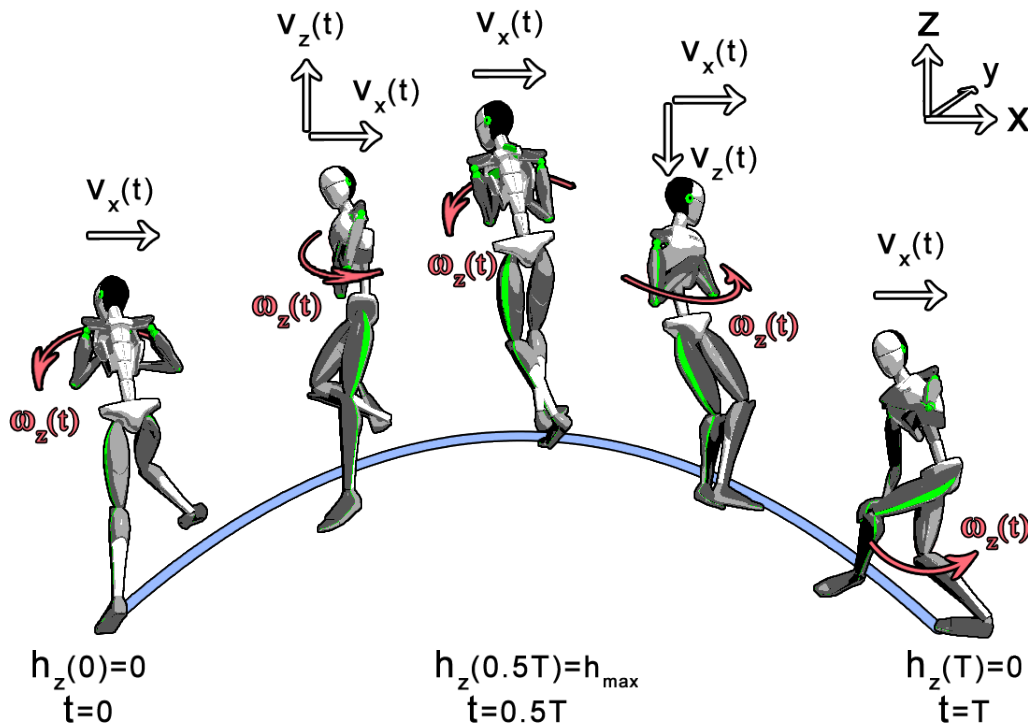
Figur 2.4: Riktningar på hastigheter och rotationer under ingången av ett axelhopp.

2.2.3 Energi i luftfärden

Från det att åkaren lämnar isen tills dess att skridskons skär träffar isen igen kan ingen energi tillföras eller försvinna, utan bara omvandlas. Den energi som åkaren erhöll innan luftfärden kommer därav fördelas över lägesenergi, rörelseenergi och rotationsenergi, vilka illustreras i figur 2.3. Att ingen ny energi kan tillföras eller försvinna innebär att energisumman under luftfärden är konstant.

Under luftfärden har hastighetsvektorn två komponenter, en i x-led samt en i z-led. När åkaren når sin högsta punkt kommer hastigheten i vertikalled vara noll, och därav även rörelseenergin i z-led. Eftersom luftmotståndet är försummat kommer hastighetsvektorn i horisontalled däremot att vara konstant genom hela luftfärden. De variabler som förändras under luftfärden är alltså hastighet i z-led, höjd i z-led och rotationshastighet runt åkarens z-axel.

När rörelseenergin minskar kommer lägesenergin i ekvation 2.12 [20] att öka, och luftfärden kan därav beskrivas visuellt med en kastparabel, se figur 2.5. För att förtydliga det intervall då åkaren är i luften benämns början på luftfärden, då åkaren lämnar isen, som $t = 0$ och landningen då åkarens skär träffar isen igen, som $t = T$.



Figur 2.5: Riktningar på hastigheter och rotationer under luftfärden av ett axelhopp.

Massan och tyngdaccelerationen är konstanta vilket innebär att höjden är direkt proportionerlig mot hastigheten i kvadrat och att lägesenergin vid högsta punkten under luftfärden ($t = 0.5T$) är lika med rörelseenergin precis när skridskon lämnar isen ($t = 0$) eller vid landning ($t = T$) förutsatt att tiden i luften är T sekunder, se ekvation 2.13.

$$E_p(t) = mgh(t) \quad (2.12)$$

$$E_p(0.5T) = E_{ky}(0 \vee T) \rightarrow mgh(0.5T) = \frac{mv_z^2(0)}{2} = \frac{mv_z^2(T)}{2} \quad (2.13)$$

Rotationshastigheten och tröghetsmomentet förändras också under hoppet, men till skillnad från energitermerna i ekvation 2.13, så ändras dessa internt inom energitermen i ekvation 2.11, det vill säga att rotationsenergin är konstant. Om energitermen är konstant och åkaren till exempel minskar sitt tröghetsmoment genom att dra in sina armar så kompenseras detta genom att rotationshastigheten ökar och på så sätt är förändringarna bevarade inom termen. Därav är en godtycklig tid t

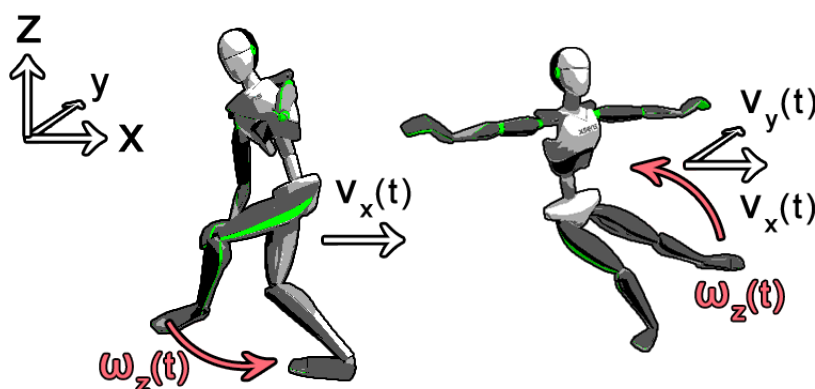
för rotationsenergin lika med en annan slumpvis tid för rotationsenergin så länge tidstermerna befinner sig inom intervallet för när åkaren har en höjd högre än noll.

2.2.4 Energi i landningen

Vid landningen som illustreras i figur 2.6 sker en omvänd energiomvandling gentemot det som händer i ingången. Rörelseenergin i vertikalled absorberas av att åkarens kropp dämpar fallet. Medelkraften som åkarens kropp absorberar under denna omvandling kan beräknas med impulslagen, se ekvation 2.14 [21], som är beroende av hastigheten innan landningen, hur lång tid det tar att gå från den maximala hastigheten till noll och åkarens massa.

$$\bar{F}\Delta t = m\Delta v \quad (2.14)$$

Rotationsenergin och rörelseenergin i x-led är konstanta en kort tid vid landning tills att åkaren svänger lite och på så sätt delar upp rörelseenergin i x- och y-led eller väljer att använda musklerna och lederna för att omvandla ny energi från kroppen. Åkaren maximerar tröghetsmomentet genom att sträcka ut benet och armarna för att sänka rotationsenergin från luftfärden vid landningen.



Figur 2.6: Riktningar på hastigheter och rotationer under landning av ett axelhopp.

2.2.5 Förluster

I detta avsnitt redogörs för de tidigare försummade förlusterna friktion och luftmotstånd som i verkligheten kommer att ha inverkan på den tidigare förenklade beskrivningen av energier i axelhoppet.

2.2.5.1 Friktion

Friktion är viktigt för alla sporter som involverar skridskor då det ser till att åkaren kan ta fart, stanna och glida. För axelhoppet är friktionen vid glidning intressant för att se om det har en märkbar hämmande effekt på hastigheten. Vid glidning smälter isen under skridskoskenan och bildar en tunn vattenhinna som fryser direkt

efter att skridskon passerat. Denna hinna fungerar som ett smörjmedel som minskar friktionskoefficienten mellan is och skena [22]. Ju kallare det är desto svårare är det att bilda denna tunna hinna och därför fungerar det inte att glida lika bra under allt för kalla förhållanden.

Luftfuktigheten, skridskoskenans area, åkarens vikt och hur snabbt åkaren glider påverkar också hur stor friktionen blir. I rapporten *Physics of ice friction* publicerad i *Journal of Applied Physics* påvisas att den lägsta friktionen temperaturmässigt uppnås mellan -2°C och -7°C grader, den lägsta hastighetsbaserade friktionen uppkommer vid runt -4°C och att sämre friktion fås vid luftfuktighet lägre än 50% [22]. En typisk ishall bör ha en luftfuktighet på runt 50% och en istemperatur på -2°C till -5°C vilket är goda förhållanden för en bra friktionskoefficient [23]. Även om resterande förhållande inte helt kan fastställas så tros friktionskoefficienten uppnå så pass lågt värde att den kan försummas. För att ytterligare påvisa detta så fann en studie att en åkare som åkte 5m/s, vägde runt 75 kg och gled på is med temperatur -5°C hade en friktionskoefficient på 0.004 [24]. Viktigt att påpeka är att studien utfördes med en klappskridsko.

2.2.5.2 Luftmotstånd

Luftmotsånd är en kraft som motverkar alla kroppar som har en hastighet relativt mediet som de rör sig i, i detta fall luft. Motståndets storlek beror på luftens densitet ρ_{luft} , den relativa hastigheten mellan kroppen och luften u , luftmotståndskoefficienten C_D och arean hos kroppen A , se ekvation 2.15 [25]. Luftmotståndet kan även uttryckas med Newtons andra lag för att få fram hur mycket kroppen retarderas.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A u^2 \rho_{luft} \quad (2.15)$$

För att bestämma huruvida luftmotståndet har en markant inverkan på åkaren så beräknas ett tänkbart maximalt och minimalt motstånd för att få reda på hur mycket åkarens hastighet påverkas. Luftmotståndskoefficienten och arean för en mänsklig kropp varierar men kan grovt antas ligga emellan 1.2-1.4 [26] och 0.35-0.95 m² [27] respektive. För beräkningarna antas kroppsarean som minst bli en fjärdedel och som mest bli hälften av hela kroppsarean. Enligt allmänna gaslagen så blir luftdensiteten hos luft med temperaturen -10°C till 0°C runt 1.29-1.34 kg/m³.

Under projektets gång fanns att hopphastigheten varierade mellan 3-5 m/s. Åkarna hade även olika vikter mellan 45-75 kg. Med dessa värden ges att luftmotståndet retarderar lättviktiga åkare mellan 2-8% av deras åkhastighet. Tyngre åkare saktas in med en acceleration av 1.5-6% av deras hastighet. Då ett hopp varar under ungefär en sekund kan en åkares hastighet antas minska med något värde inom det procentintervallet. Luftmotståndet antas inte påverka åkaren avsevärt i vertikalled då kroppens area och hastighet blir såpass låga jämfört med i horisontalled.

2.3 Tidigare kandidatarbeten

Tidigare har två kandidatarbeten om konståkning genomförts vid Chalmers tekniska högskola. Det första [8], genomfört vårterminen 2016, hade syftet att studera dagens hopp teknik och göra mekaniska analyser på dessa. De studerade två olika varianter av hopp nämligen bestämt axel- och ögelhopp. Genom att göra detta kunde de ta fram fyra parametrar som de ansåg mer relevanta att fortsätta studera än andra: hopphöjd, vinkelhastighet, tröghetsmoment och vinkeln mellan åkarens höfter och axlar. Arbetet resulterade i slutändan i att mätutrustningen, Xsens Link- och Awinda-system, köptes in för att i framtiden kunna göra mer ingående analyser av relevanta parametrar. Det är denna utrustning som utnyttjats i detta arbete och som beskrivs ingående i metodavsnittet.

I det andra kandidatarbetet, genomfört våren 2017 [11], låg fokus kring att bland annat evaluera vilket av de två inköpta systemen, Link och Awinda som är bäst lämpat för mätningar på konståkare. Den relativt omfattande studien gav resultatet att Link-systemet var det som bäst lämpade i sammanhanget. Främst eftersom samplingstiden för det systemet är fyra gånger högre än för Awinda-systemet, vilket ger mer noggrann mätdata och en bättre beskrivning av de uppmätta hoppen. Med hjälp av denna studie har det här arbetet endast utnyttjat Link-systemet. Systemet beskrivs mer ingående i metodavsnittet.

Kandidatarbetet från 2017 ämnade också att fortsätta utreda vilka parametrar som är betydande för lyckade axelhopp. Mätningar och analyser av så väl enkel- som dubbel- och trippelaxel gjordes. De parametrar som studerades var bland annat hopphöjd mot medelrotation. Hur fördelningen måste se ut mellan dessa parametrar för att klara ett hopp och hur denna fördelning skiljer sig mellan olika åkare. Antalet genomförda varv kontra tiden för genomförandet och rotationshastighet mot tid studerades också. Dessutom fördjupades det i hur hastighetsfördelningen ser ut under ett hopp, rotationshastighet vid hoppets start jämfört med vid hoppets landning samt den tid det tar för en åkare att uppnå sin maximala rotationshastighet.

I arbetet drogs slutsatser kring att hopphöjd och rotationshastighet var de två viktigaste parametrarna för att lyckas med axelhopp. I rapporten påvisas att det långsiktiga målet för en åkare som vill lyckas med något av ovan nämnda hopp är att långsiktigt satsa på att förbättra sin hopphöjd, eftersom detta är den parameter som majoriteten av åkarna har svårast att kontrollera. En högre hopphöjd ger också åkaren mer tid i luften att genomföra sin rotation på. Det konstaterades också att mer erfarna åkare hade en betydligt lägre rotationshastighet vid landningen än de mindre erfarna åkarna. Detta indikerar på att de mer erfarna har haft nog med tid att avsluta sin rotation innan de landar, och har därmed också större chans till att stå hoppet.

3

Metod

I metodavsnittet beskrivs och motiveras tillvägagångssättet för projektets tre olika delar: insamling av data, bearbetning av data samt analys av data.

3.1 Insamling av data

För att samla in data genomfördes flera mätningar på utövare där datainsamlingen utfördes med hjälp av Mocap-teknologi samt videoinspelningar. Mätningarna genomfördes på is vid fem tillfällen där totalt sex stycken åkare medverkade. Personerna som deltog blev kort informerade om syftet med datainsamlingen och fick efter förberedelser med mätutrustningen, som beskrivs senare i avsnittet, tid till att värma upp och göra sig redo för mätningarna. Åkarna ombads sedan att genomföra åtminstone fem, men gärna mellan 10-15 enkla axelhopp, i eget tempo. Efter en kortare vila upprepades sedan mätningarna för vissa av åkarna, denna gång med dubbla axelhopp istället. Flera av åkarna fick emellan hoppen instruktioner av sina respektive tränare. Då flera av åkarna var mycket unga, lades vikt vid att inte pressa åkarna utan låta de utföra hoppen i egen takt och efter egen kapacitet.

Ambitionen var redan från projektets start att prioritera få, men högkvalitativa mätningar framför mycket insamlad data av sämre kvalitet. Figur 3.1 nedan är tagen under ett inspelningstillfälle i Frölundaborg, Göteborg. Åkaren genomförde under sessionen flertalet enkel- och dubbelaxlar som mättes och filmades.



Figur 3.1: Mätningar med hjälp av videoinspelning och Xsens-systemet.

3.1.1 Urval av konståkare inför mätningar

Kravet på de deltagande utövarna var att de skulle ha påbörjat träning på dubbelt axelhopp. För att ha någonting att utgå från i de senare analyserna genomfördes mätningar på två åkare som utövat konståkning på elitnivå och som därmed kunde utföra både enkel- och dubbelaxel så felfritt som möjligt. Utöver dessa åkare var utövare på alla nivåer av intresse för projektet.

3.1.2 Datainsamling med Mocap-teknologi

För att samla in data användes främst Mocap-teknologi genom programvaran Xsens MVN med tillhörande, och tidigare nämnda Link-system. Utrustningen gjorde det möjligt att i detalj samla in data som accelerationer, vinkelhastigheter och positioner för flertalet av åkarens kroppsdelar. Programvaran simulerar en avancerad biomekanisk modell av åkarens rörelser som gjorde det möjligt att detaljstudera och jämföra parametrar i de inspelade hoppen.

3.1.2.1 Beskrivning av Xsens-systemet

Mocap-systemet från Xsens gör det möjligt att samla in och visualisera data från åkarens rörelse under ett axelhopp. Den fysiska mätdräkten, kallad Link, består av en helkroppdräkt med totalt 17 utplacerade sensorer. Placeringen av sensorerna kan ses i figur 3.2, och i tabell 3.1 listas de med respektive namn. Sensorerna samlar in data med ett samplingsintervall på 240 Hz, vilket i praktiken innebär att det var möjligt att få ut parametrar som hastighet och position för åkaren i 240 positioner per sekund [28]. För att bearbeta datan innehåller Xsens-systemet en mjukvara kallad MVN Analyze.

Mätsystemet består av en heldräkt i vilken sensorerna placeras. Sensorerna placeras på dräktens kardborreband, som är utplacerade där sensorerna är tilltänka att sitta. Vid mätningar var det av stor vikt att sensorer på höger respektive vänster sida av kroppen placerades parallellt för att uppnå så bra mätresultat som möjligt. När dessa placerats dras dragkedjor i dräkten igen som hjälper till att skydda sensorerna och omöjliggöra att åkaren fastnar i kablarna som länkar dem till varandra. Utövaren förses också med pannband och handskar som alla innehåller en sensor var. När åkaren tagit på sig skridskon förses även dessa med varsin sensor som tejpas på ovansidan av skridskon. Ett batteri samt ett body-pack sköter överföringen av data till mjukvaruprogrammet. Både batteriet och body-packet fästs i dräktens kardborreband i ländryggen på åkaren. Detta misstänktes i tidigt stadie kunna påverka åkaren på grund av den extra vikt som tillfördes, liksom farhågor fanns för att åkaren hade kunnat skada sig ifall hen vid fall skulle landa på dessa. Det visade sig dock efter ett antal mätningar inte vara något större problem.



Figur 3.2: Placering av sensorer (orange), batteri (gul) och body-pack (blå).

Tabell 3.1: Tabell över sensorerna som placeras i helkroppsdräkten. Numren representerar positionen från figuren ovan.

Nummer	Segment	Nummer	Segment
1	Pelvis	11	Left hand
2	Sternum	12	Right upper leg
3	Neck	13	Right lower leg
4	Right shoulder	14	Right foot
5	Right upper arm	15	Left upper leg
6	Right lower arm	16	Left lower leg
7	Right hand	17	Left foot
8	Left shoulder	B	Batteri
9	Left upper arm	P	Body-pack
10	Left lower arm		

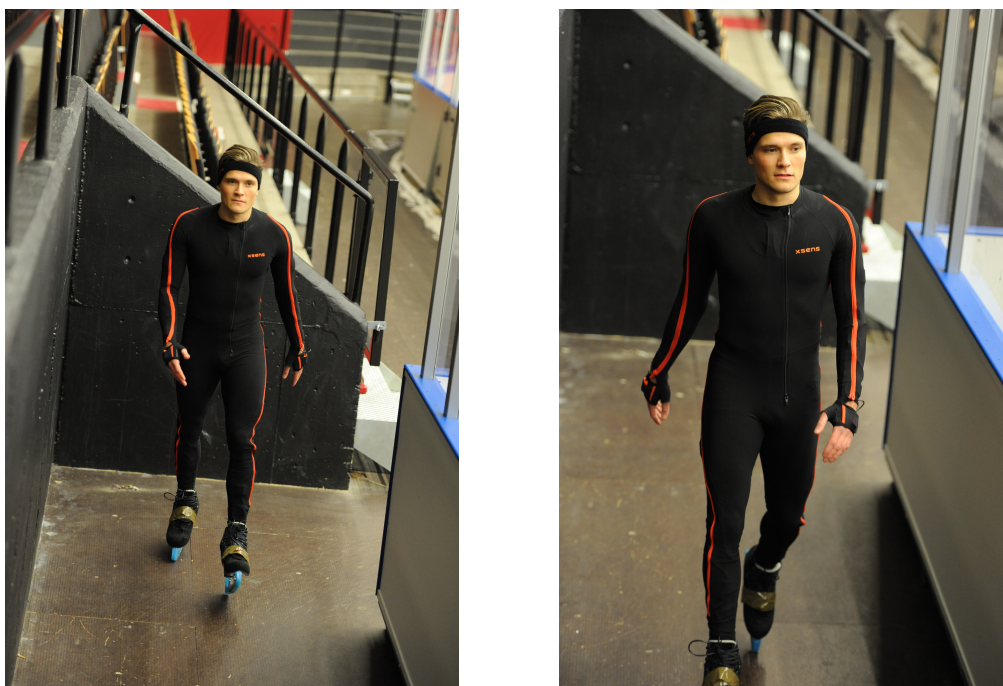
En så kallad profil skapades i Xsens för varje åkare som deltog i mätningarna. I profilen noterades olika mått för respektive åkare. De mått som användes var åkarens längd utan skridskor, skridskons längd från häl till tå samt den extra höjd som skridskon tillförde. Den extra höjden mättes från nedre delen utav skridskons skena upp till övre kanten på skridskons klack. Övriga mått så som armarnas längd approximerades av programmet och fördes automatiskt in.

3.1.2.2 Kalibrering av Xsens-systemet

För att kunna samla in data som återger verkligheten på ett rättvisande sätt krävdes det att dräkten kalibrerades efter att åkaren försetts med dräkt och sensorer. Innan kalibreringen kunde en modell av åkaren observeras i datorn, och redan vid en snabb anblick gick det att avgöra att återspeglingsbilden av åkarens rörelser inte var korrekt. Detta på grund av att kalibreringen av sensorernas positioner ej genomförts.

Kalibreringen utfördes genom att åkaren placerades, med skridskor, ståendes på en plan yta bredvid isen. Åkaren ombads att stå i N-position, vilket innebar att åkaren skulle stå rakt, med händerna tryckta mot höfterna och fötterna höftbrett isär riktade framåt. Då kalibreringsprocessen startades i datorn ombads åkaren gå med naturlig, ledig stil fyra till fem meter framåt, se figur 3.3, vända sig om och gå tillbaka och ställa sig i N-positionen på startplatsen igen. När detta hade genomförts erhöles genast information om kalibreringen var godkänd. För att säkerställa kvalitén gjordes en uppskattning över hur rörelserna i datorn återspeglade rörelserna åkaren gjorde. Vid flertalet tillfällen fick kalibreringsprocessen upprepas, mest troligt på grund av att åkaren inte haft en tillräckligt naturlig gångstil under tidigare kalibrering.

När väl ett tillfredsställande resultat i kalibreringen uppnåts ombads åkaren att placera sig i N-positionen på isen, i närheten av det tilltänka hoppområdet för att kunna definiera koordinataxlarna i mjukvaran.



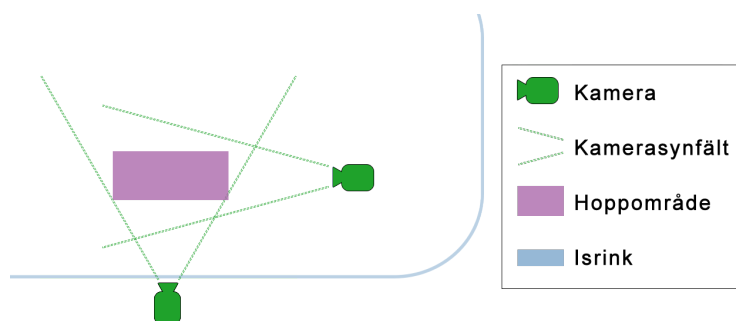
Figur 3.3: En åkare under kalibrering av Link-systemet.

3.1.3 Insamling av videodata

Xsens-systemet kan simulera och beräkna hastigheter och avstånd när en person går, springer och hoppar. Detta inkluderar dock inte den glidande rörelsen som sker på skridskor. Systemet tolkar detta som en stillastående rörelse som därav resulterar i en statisk position i programmet.

För att få fram hastighet relativt isen och åkarens hopplängd gjordes i samband med mätningarna inspelningar med två kameror. Kamerorna var positionerade så att hoppen fångades ur två vinklar, se figur 3.4. Den ena kameran hade höghastighetsinspelning (100 fps) och placerades så att hoppen fångades i profil, den andra spelade in med i normal upplösning (25 fps) och placerades så att hoppen fångades framifrån. Kamerorna som användes var av modellerna Panasonic DMC-FZ200 och Canon LEGRIA HF G10, se figur 3.5(a) och figur 3.5(b).

För att efter insamling av videodata kunna beräkna hastigheter och avstånd gjordes markeringar i isen innan mätningarna. Det krävdes minst fyra distinkta linjer vilka tillsammans bildade en rektangel som åkaren utförde sina hopp inom. Hoppytan var under mätningarna kring tre gånger fyra meter. På grund av begränsat utrymme i en del ishallar placerades kamerorna annorlunda så att hoppytan istället bildades av en rätvinklig triangel.



Figur 3.4: Exempel på kamerapositioner och utmarkerat hoppområde på en skridskorink.



(a) Panasonic DMC-FZ200



(b) Canon LEGRIA HF G10

Figur 3.5: De två kamerorna som användes under mätningarna.

3.2 Bearbetning av data

Efter att data hade samlats in behövde den bearbetas vilket gjordes med hjälp av ett antal olika programvaror.

3.2.1 Bearbetning av Mocap-data

För att bearbeta den insamlade Xsens-datan användes MVN Analyze. I programmet var det möjligt att studera parametrar från varje enskilt hopp var och ett för sig. På ett överskådligt och lättillgängligt sätt gick det att studera kurvor som beskrev hastigheter, positioner och många andra parametrar för varje enskild del av den biomekaniska modellen. Det fanns dock ett stort intresse att jämföra hopp med varandra, att ta fram extrempunkter och att studera enskilda delar av ett hopp. För att göra detta användes beräkningsprogrammet Matlab. Från mätningarna gavs data från 23 segment och 20 leder i modellen, dessa är listade i tabell 3.2. Från de olika segmenten kunde parametrarna i tabell 3.3 erhållas.

Genom att exportera de inspelade Xsens-filerna till ett filformat kompatibelt med Matlab (.mvnx) var det möjligt att få ut all data från inspelningarna direkt i beräkningsprogrammet. MVN Analyze användes som stöd vid beräkning och visualisering av valda parametrar. Att studera modellen från inspelningen var ett relativt enkelt sätt att säkerställa att rätt data togs fram till de senare analyserna.

I detta stadie var det möjligt att utesluta vissa inspelningar som var av sämre kvalitet. En del inspelningar innehöll, av olika anledningar brus och uppenbara fel i de värden som återgavs. Detta kunde exempelvis bero på att en sensor i dräkten flyttat på sig eller att mjukvaran arbetat för långsamt.

Tabell 3.2: Tabell över segment och leder.

Segment			
Pelvis	L5	L3	T12
T8	Neck	Head	Right shoulder
Right upper arm	Right fore arm	Right hand	Left shoulder
Left upper arm	Left fore arm	Left hand	Right upper leg
Right lower leg	Right foot	Right toe	Left upper leg
Left lower leg	Left foot	Left toe	
Leder			
jL5S1	jL4L3	jL1T12	jT9T8
jT1C7	jC1Head	jRightC7Shoulder	jRightShoulder
jRightElbow	jRightWrist	jLeftC7Shoulder	jLeftElbow
jLeftWrist	jRightHip	jRightKnee	jRightAnkle
jRightballfoot	jLeftHip	jLeftKnee	jLeftAnkle
jLeftfootball			

Tabell 3.3: Tabell över variablerna som går att använda i MVN.

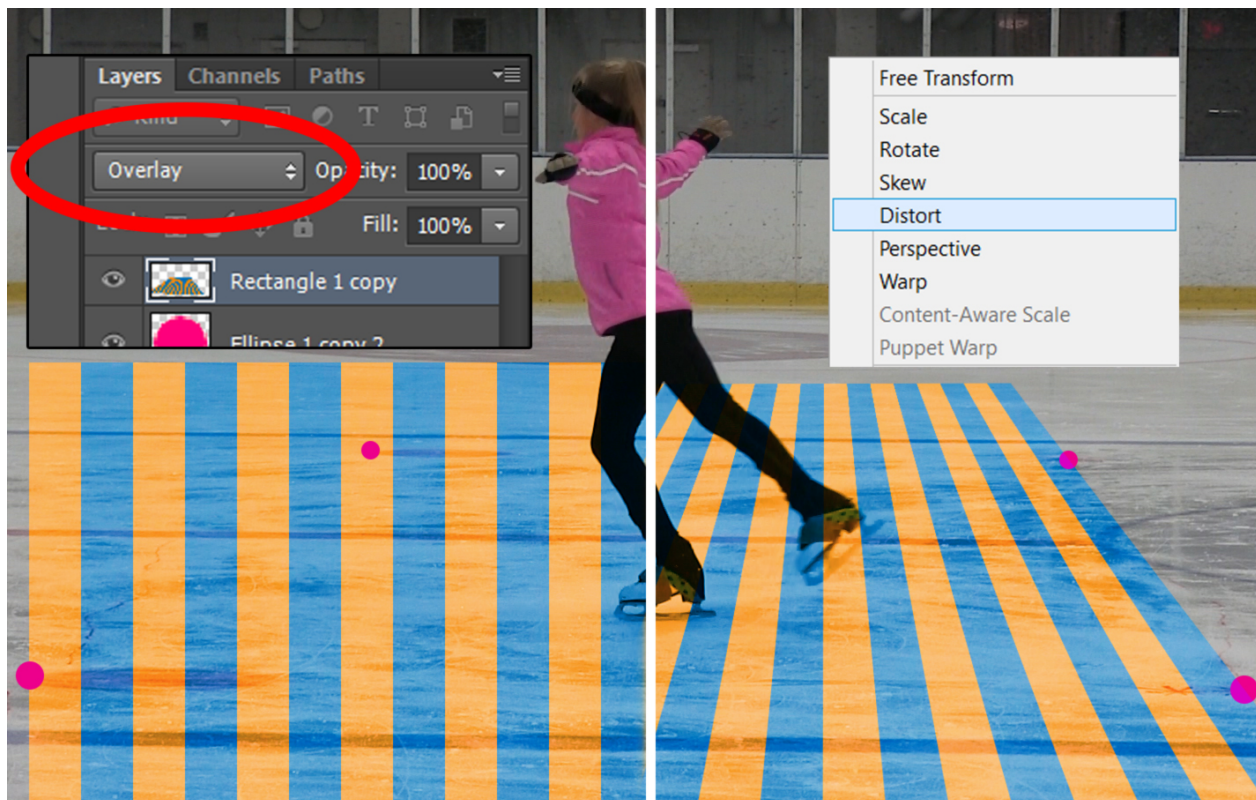
Variabler			
Position	Velocity	Orientation	Acceleration
Angular velocity	Angular acceleration	Sensor angular velocity	Sensor magnetic field
Sensor orientation	Joint angle	Joint angle XYZ	Center of mass

3.2.2 Bearbetning av videodata

Videoredigering utfördes med programmet Adobe After Effects. Målet med redigeringen var att införa ett lätt sätt att uppskatta längd och tid i videon. För att göra detta infördes ett bildlager ovanpå det tidigare utmarkerade hoppområdet. Därefter transformerades det så att det fick samma perspektiv som kameravinkeln. Då kameravinkeln var stationär kunde perspektivet på bildlagret ändras innan det infördes i videon.

Det bildlager som användes var randigt. Antal ränder är beroende av hur stort hoppområdet är. Det hoppområde som användes i testerna var 300 cm brett och 400 cm långt vilket gjorde att bildlagret behövde bestå utav 30 ränder i videon inspelad framifrån och 40 ränder i inspelningen i profil. När bildlagrets mått bestämts skapades det och infördes på en stillbild från videon.

För att kunna se var skridskorna landar används inställningen 'Overlay' på bildlagrets blandningsläge (eng: Blend Mode) som gör att bildlagret endast reflekteras mot det vita på isen. Därefter transformeras bilden med transformeringsläget 'Distort' som används för att placera bildlagret i samma perspektiv som kameran. För att göra det används de distinkta linjerna som markerades på isen vid inspelningen. Detta illustreras i figur 3.6. Dessa linjer kan även överlappa varandra i samma bild så att det bildas ett rutnät.

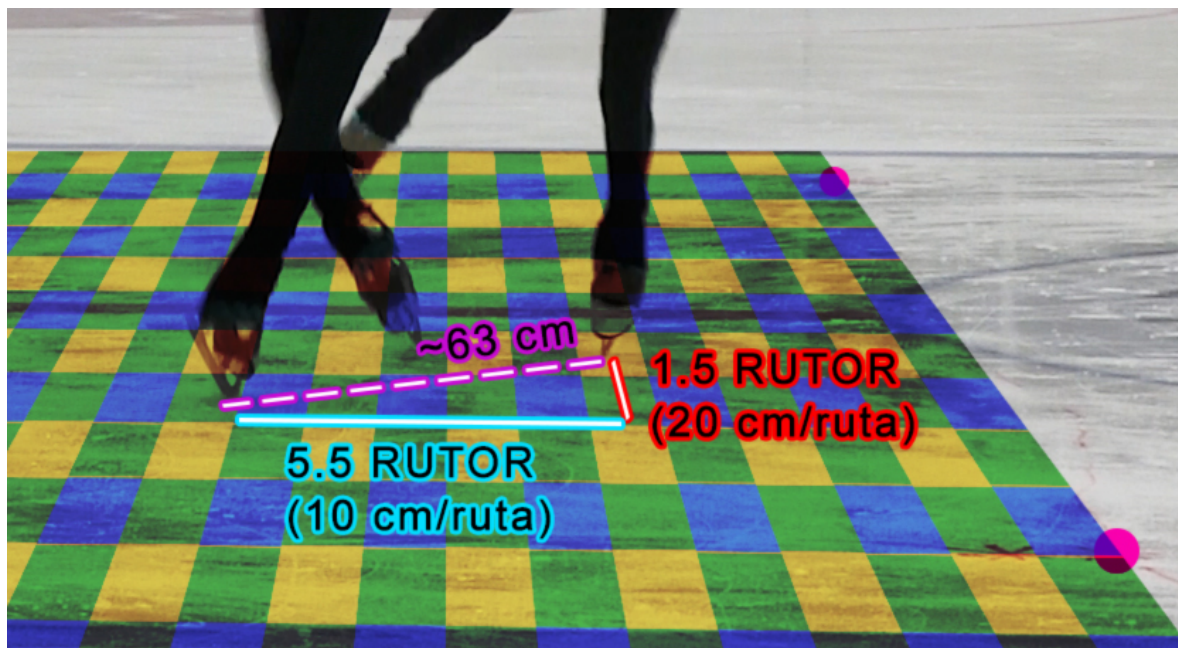


Figur 3.6: Använd "Overlay" för att göra bildlagret genomskinligt (Till vänster) och "Distort" för att skapa ett perspektiv med hjälp av de utsatta punkterna (Till höger).

Genom det bildlager som placerades över det utmarkerade området kan en uppskattning göras över hur långt konståkaren hoppar. Längden av ett hopp bestämdes från där åkarens tåspets lämnar isen till där den sätts i igen. Genom att notera var skridskon lämnar isen samt var den sätts i igen kan antalet rutor som åkaren flyttar sig noteras. Därefter beräknas differensen av de båda punkterna, se figur 3.7 för exempel.

För att mäta tiden noterades då skridskon lämnade isen till det att kontakt togs igen. Medelhastigheten under hoppet beräknades utifrån de uppskattade värdena, se ekvation 3.1. Samma metod användes för att beräkna hastigheter i ingång och landning.

$$\bar{V} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.1)$$



Figur 3.7: Exempel på hopplängdsuppskattning.

3.3 Beräkningar och förenklingar

Den bearbetade datan användes för att genomföra analyser som utgör resultatet av arbetet. I detta avsnitt beskrivs tillvägagångssättet för analyserna. De förenklingar och antaganden som gjorts motiveras och beskrivs.

3.3.1 Energitermer

Energiberäkningarna gjordes i tre olika ögonblick under hoppen. Den första vid tidpunkten då åkaren har sin lägsta tyngdpunkt och största knävinkel i högerbenet. Den andra då åkaren når sin högsta punkt under luftfärden och den tredje då åkaren landat och har fötterna i linje med varandra. Dessa punkter valdes för att de bedömdes bidra till analyser av energi som musklerna tillför i upphopp och landning.

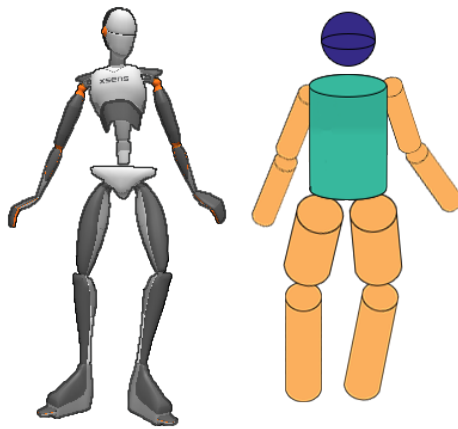
3.3.1.1 Rörelseenergi

De hastigheter som utnyttjades för att ta fram den kinetiska energin för åkaren är som nämnts i avsnitt 3.2.2 medelhastigheter för tidpunkterna. Antaganden som gjordes var att åkaren bedömdes ha samma hastighet i hela kroppen under dessa tidpunkter och därav kunde fotens hastighet användas i beräkningarna. Det antogs också att åkaren i alla tre tidpunkterna enbart hade hastighet i x-y-planet, och inte i z-led. Detta motiverade också valet av den andra tidpunkten för energiberäkningarna, högsta punkten under luftfärden, då det genom att studera åkarens kastparabel såg att hastigheten i z-led blir noll. Detta förenklade energiberäkningarna avsevärt. Då luftmotståndet under luftfärden, beskrivet i avsnitt 2.2.4.2 ansågs vara liten i

förhållande till övriga krafter försummas dessa förluster under energiberäkningarna.

3.3.1.2 Rotationsenergi

För att beräkna rotationsenergierna vid de tre utvalda tidpunkterna gjordes flera förenklingar, främst av tröghetsmomenten. Åkarens kropp är i beräkningarna uppbyggda av geometriska figurer enligt figur 3.8. Åkarens överkropp består av en elliptisk cylinder, huvudet av ett klot samt armar och ben av cylindrar med olika diametrar och längder. Värdena för de olika delkropparna gavs av data från programvaran Xsens samt från medelvärden av människans kropps mått. Dessa värden presenteras i sin helhet i bilaga A.



Figur 3.8: Hur kroppsdelarna förenklats i beräkningarna av tröghetsmoment.

För att möjliggöra jämförelser av energier mellan olika åkare valdes beräkningarna att göras i enheten Joule per kg kroppsvikt (J/kg). Massorna för de olika kroppsdelarna skalades enligt viktfordelningen av en genomsnittlig människokropp [30]. Respektive kroppsdel antogs ha en jämnt fördelad massa med tyngdpunkt liggandes i centrum av kroppssegmentet.

4

Resultat

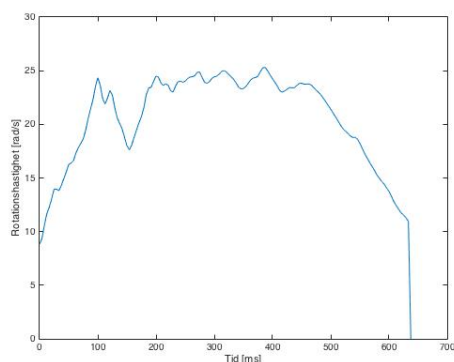
Här presenteras de resultat som genererats från den insamlade datan från kapitel 3. Vilka parametrarna som skulle studeras beslutades utifrån samtal och diskussioner med aktiva tränare och åkare. De parametrar som utsågs och presenteras i resultatet är rotationshastigheter, medelhastigheter, vinklar i rygg, vinklar i knä, hopphöjd och impuls kraft samt energibalans. Parametrarna för åkarnas hopp jämfördes både individuellt och sinsemellan.

Sammantaget presenteras data från totalt fyra åkare, två manliga seniorer som tävlat på elitnivå samt två kvinnliga juniorer. På grund av en varierande nivå hos åkarna innehåller avsnitten inte konsekvent data för både enkla och dubbla axelhopp.

4.1 Rotationshastighet

För att utreda om rotationshastighet är en parameter som påverkar utfallet av ett axelhopp användes diagram för respektive åkare. Jämförelser görs i texten mellan de olika åkarnas enkla axelhopp och därefter dubbla axelhopp. Dessutom påvisas resultat från jämförelse mellan samma åkare som har genomfört både enkla och dubbla axelhopp.

För var och en av de fyra åkarna utformades diagram över rotationshastigheterna kontra tiden från det att åkaren lämnar isen till dess att skridskon sätts i igen, se figur 4.1. Rotationshastigheten och tiderna som används är data uppmätt från sensorn placerad vid bäckenbenet, se 'Pelvis' i tabell 3.1.

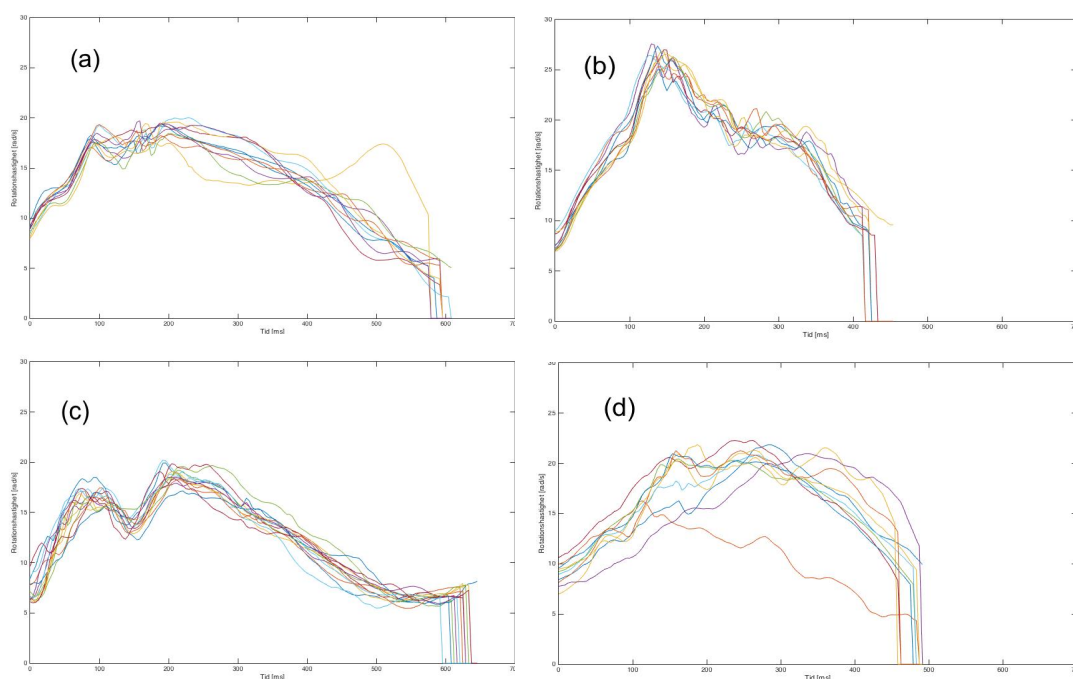


Figur 4.1: Exempel på graf över rotationshastigheter mot tid i luften under luftfärden av ett axelhopp.

Arean under hastighetsgrafen i figur 4.1 representerar den vinkeln som åkaren roterar från det att skridskon lämnar isen till dess att skridskon träffar isen igen. För att klara ett visst hopp behöver åkaren ha en rotationshastighet som totalt sett genererar den area som motsvarar de gradantalet som åkaren ämnar till att klara. Åkaren har dock redan påbörjat rotationen innan skridskon lämnar isen samt fortsätter rotera efter att skridskon träffat isen igen. På grund av detta bör gradtalet från upphopp till landning vara något lägre än det som krävs för det totala hoppet.

4.1.1 Rotationshastigheter under ett enkelt axelhopp

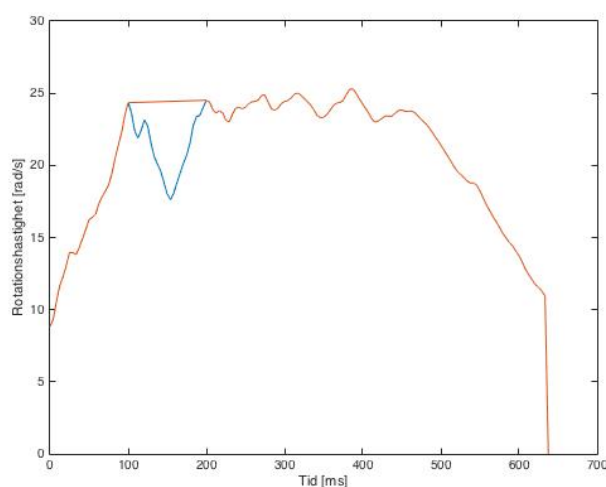
Figur 4.2, visar sambandet mellan rotationshastigheter och tid för var och en av åkarnas enkla axelhopp. Genom att studera och jämför graferna för axelhoppet kan olika resultat påvisas. Översiktligt kan det observeras att åkare 2 har en högre maxrotation än åkare 1, 3 och 4. Det kan dessutom iakttas att åkare 2 och 4 snabbare får rotationen att avta efter att ha nått maxrotation. I diagram (a), (b) och (d) i figur 4.2 kan ett lokalt minimum i rotationshastighet urskiljas, dessa kring 150 ms från upphoppet. Efter det lokala minimumet når åkarna i de flesta fall sin maximala rotationshastighet. Åkare 2 saknar tydligt fall, se (b).



Figur 4.2: Rotationshastigheter mot tid i luften under luftfärden för enkelaxel och varje åkare, (a) enkelaxel åkare 1, (b) enkelaxel åkare 2, (c) enkelaxel åkare 3, (d) enkelaxel åkare 4

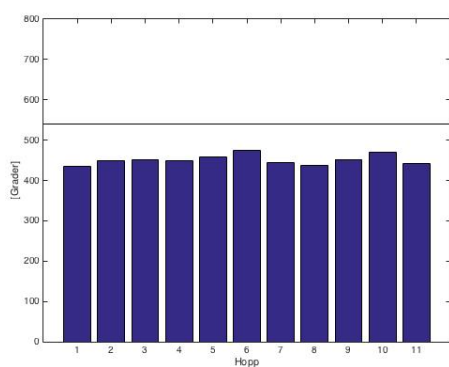
4.1.1.1 Arean under graf för rotationshastighet under enkelt axelhopp

För att beräkna areorna under luftfärden för de olika hoppen i figur 4.2 approximeras en rät linje mellan toppen innan minimat till toppen efter minimat, se figur 4.3. Den blåa kurvan representerar minimat medan den röda beskriver den nya approximerade kurvan. När en ny kurva är definierad subtraherades den gamla kurvan från den nya vilket resulterar i den arean som minimat representerar. För att illustrera areorna under graferna samt hur stort minimat är som uppstår under luftfärden används stapeldiagram, se figur 4.4 och 4.5. Diagrammen har olika skalor för arean under rotationshastigheten och för arean som minimat representerar.

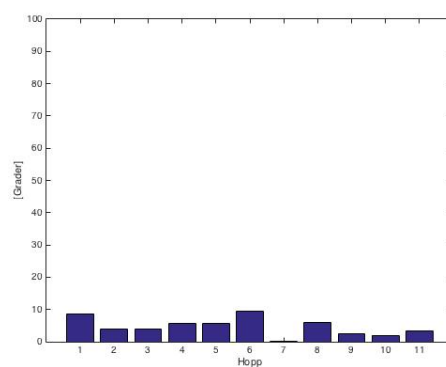


Figur 4.3: Exempel på rotationshastigheter med ny approximerad kurva. Den blåa kurvan representerar minimat medan den röda representerar den nya approximerade kurvan.

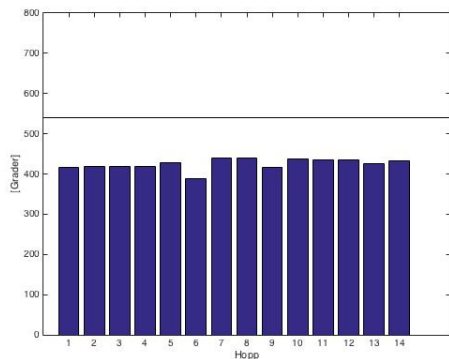
Areorna för de olika åkarnas luftfärd varierar individuellt mellan hoppen med ± 50 grader, se figur 4.4 och 4.5. Åkare 1 roterar i luftfärden ca 450 grader, se (a), vilket betyder att det saknas 90 grader för att under luftfärden rotera klart ett enkelt axelhopp. Arean som minimat representeras och illustreras i (b) är mellan 0 och 10 grader. Åkare 3 har för respektive hopp runt 425 grader och ett minima mellan 10 och 20 grader, se (c) och (d).



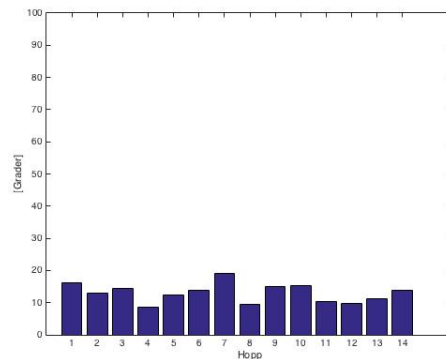
(a) Åkare 1, area under kurvan för rotationshastigheter.



(b) Åkare 1, area som minimat representerar.

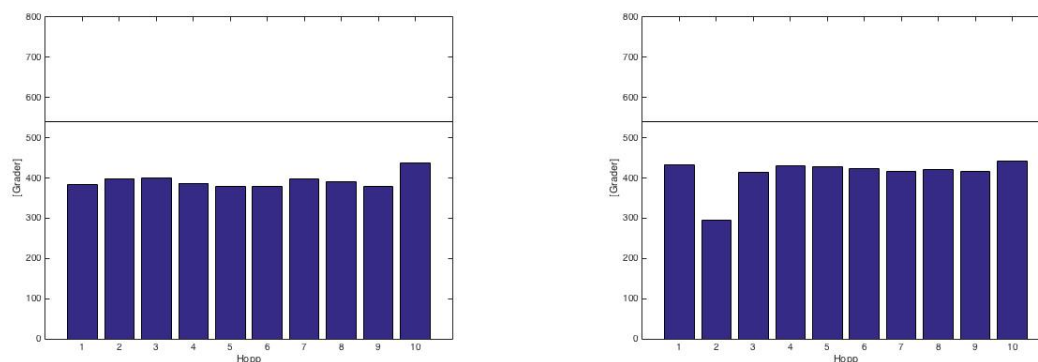


(c) Åkare 3, area under kurvan för rotationshastigheter.



(d) Åkare 3, area som minimat representerar.

Figur 4.4: Area under luftfärden av ett enkelt axelhopp samt area för minimat med varierande y-axlar



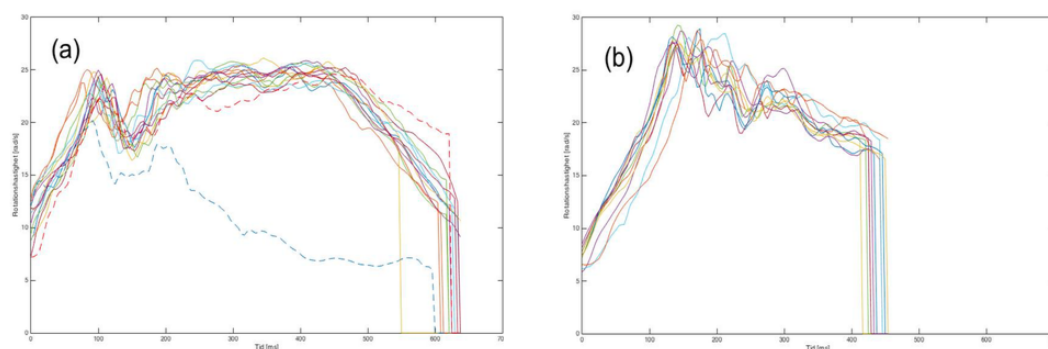
(a) Åkare 2, area under kurvan för rotationshastigheter.

(b) Åkare 4, area under kurvan för rotationshastigheter.

Figur 4.5: Area under luftfärden av ett enkelt axelhopp för de åkare utan minima.

4.1.2 Rotationshastigheter under ett dubbelt axelhopp

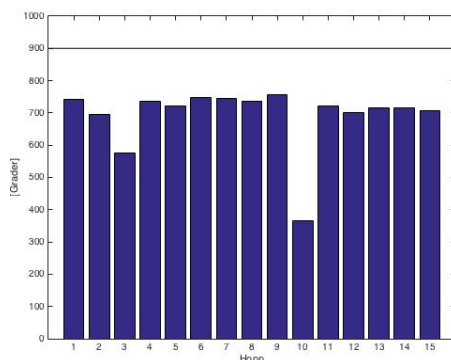
Det dubbla axelhoppet klarades endast helt utav åkare 3. Däremot erhöles ett resultat för åkare 2, men åkaren lyckades inte att utföra hoppet helt. Graferna i figur 4.6 visar rotationshastigheterna kontra tiden under luftfärden för ett dubbelt axelhopp. Graf (a) för åkare 3 i figuren påvisar att det uppstår ett likadant lokalt minima som under det enkla axelhoppet för samma åkare. Minimat uppstår även här efter ungefär 150 ms av luftfärden. Maxrotationerna för de olika åkarna är runt 25 rad/s för åkare 3 och 28 rad/s för åkare 2.



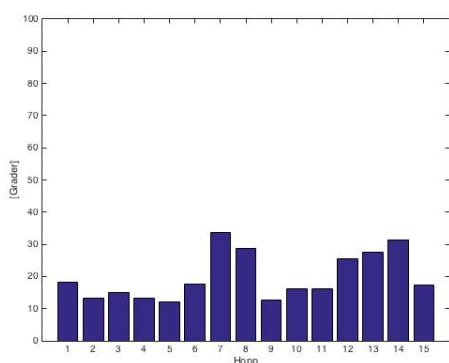
Figur 4.6: Rotationshastigheter mot tid i luften under luftfärden för dubbelaxel och varje åkare, (a) åkare 3, (b) åkare 2.

4.1.2.1 Areal under graf för rotationshastighet under ett dubbelt axelhopp

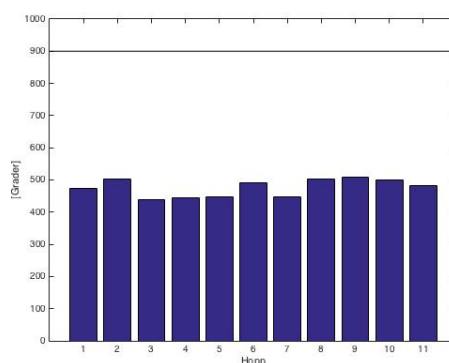
Area under luftfärden av ett dubbet axelhopp samt area för minimat som uppstår för åkare 3 illustreras i diagram 4.7. Skillnaden i grader mellan åkare 2 och åkare 3 är stora. Åkare 3 ligger runt 700 grader medan åkare 2 ligger under 500. Det kan även observeras att graderna som minimat representerar för åkare 3 är högre för dubbelaxel än för enkelaxel och ligger här mellan 10 och 30 grader.



(a) Åkare 3, area under kurvan för rotationshastigheter.



(b) Åkare 3, area som minimat representerar.

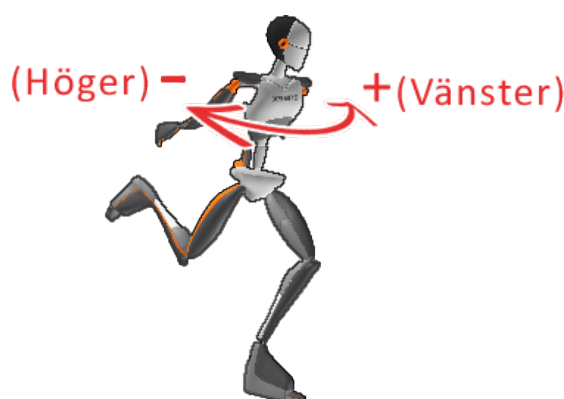


(c) Åkare 2, area under kurvan för rotationshastigheter.

Figur 4.7: Area under luftfärden av ett enkelt axelhopp samt area för minimat med varierande y-axlar.

4.2 Vinkel i ryggraden relativt höften under hoppet

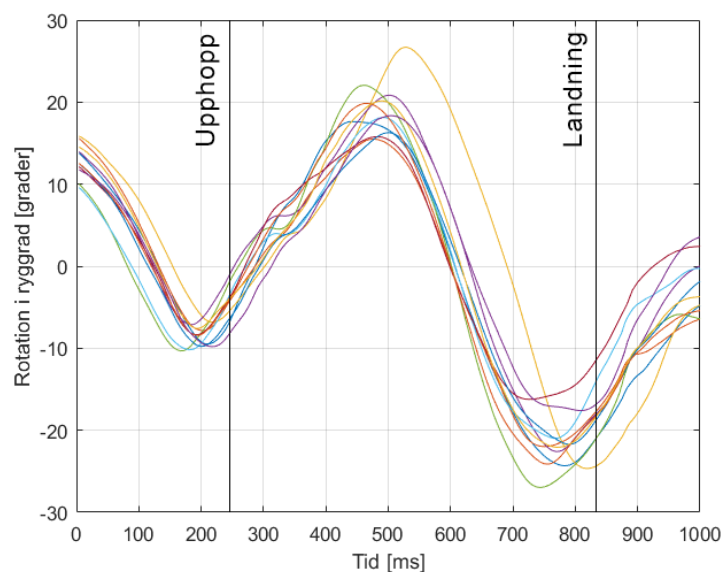
Vinkel i ryggraden syftar på hur mycket framsidan av bröstet vrider sig i förhållande till höften, se figur 4.8. I detta avsnitt presenteras fyra av åkarnas ryggrotationer under enkla axelhopp och en åkares dubbla axelhopp. Graferna som presenteras är märkta med gradtal längst y-axeln och går från -30 till 30 grader längst med en tidsaxel. Ett negativt gradtal innebär att överkroppen är snedställd åt höger medan en positiv innebär snedställning åt vänster. En "högerställning på 15 grader" innebär att grafen visar -15 grader. Noll grader indikerar på en rak hållning i ryggen i förhållande till höften.



Figur 4.8: Hur ryggvridningen definieras, en rak hållning definieras som noll grader.

4.2.1 Åkare 1

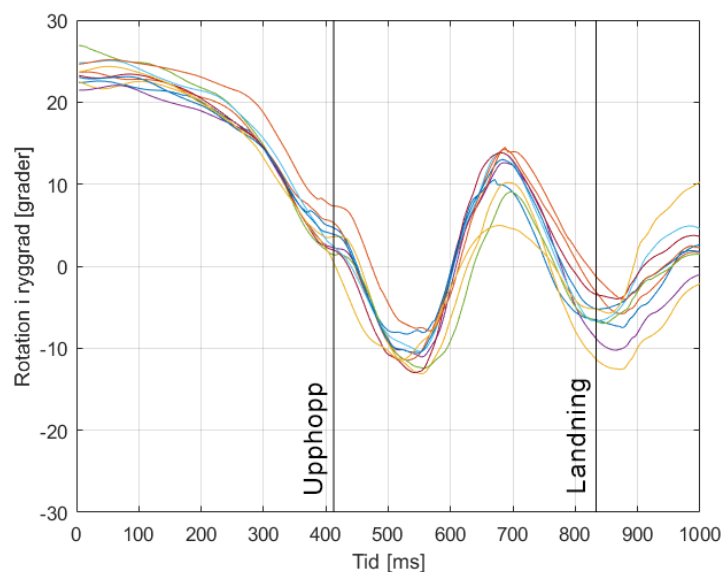
Figur 4.9 visar att åkare 1 laddar upp genom att vrida överkroppen 10 grader åt höger till strax innan upphoppet. Ungefär 25 ms innan upphoppet påbörjas en vridning åt vänster som fortsätter under hoppet till 20 grader. Lite innan halva hoppet har skett vänder åkaren tillbaka överkroppen och når en 20-gradig högerställd vridning ungefär 80 ms innan landning. Efter det vänstervrids kroppen igen så att åkaren når en rak, nollgradig, hållning kort efter landning.



Figur 4.9: Vridningen i överkroppen för åkare 1 (enkelaxel), alla hopp godkända.

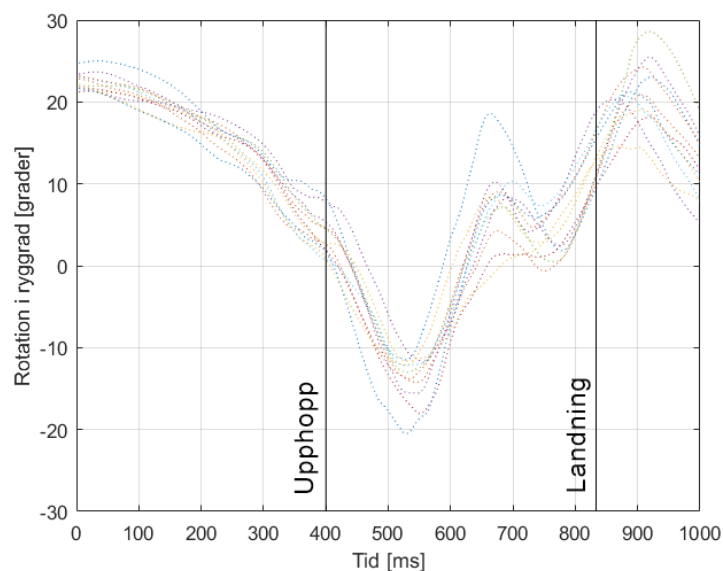
4.2.2 Åkare 2

Åkare 2 klarade alla sina enkla axelhopp, se figur 4.10. Åkaren försökte sig även på att hoppa dubbelaxel men lyckades inte helt, se figur 4.11. Åkarens ryggvridning under enkelaxel tar formen av en 180 graders förskjuten sinuskurva. Innan upphoppet är åkaren vänsterställd men vrider upp sig när upphoppet kommer närmre. Vid upphoppet har åkaren en vänstervridning på ungefär fem grader men fortsätter vrida sig åt höger under hoppets första fas upp till tio grader åt höger. En tredjedel in i hoppet börjar en hastig vridning åt vänster som håller på till personen är 10 grader vänsterställd efter två tredjedelar av hoppet. Under sista tredjedelen högerställs kroppen igen till en femgradig ställning vid landning. Precis som åkaren i avsnitt 4.2.1, så stabiliseras hållning runt noll grader kort efter landning.



Figur 4.10: Vridningen i överkroppen för åkare 2 (enkelaxel), alla hopp godkända.

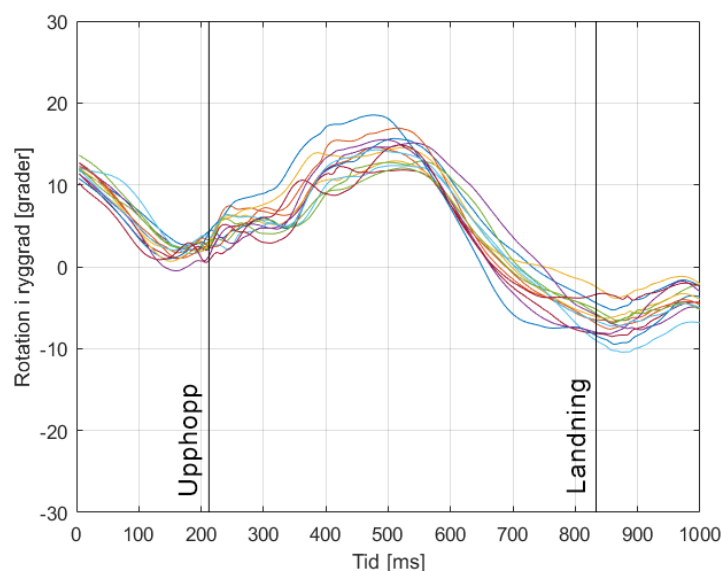
Grafen för åkarens dubbla axelhopp följer samma vridning som under enkelaxel fram till två tredjedelar in i hoppet. Därefter håller åkaren en vänsterställd vridning resten av hoppet. Först med en liten dipp ner till fem grader och därefter upp till 10-15 grader vid landning för att toppa vid 20 grader efter landning och sedan försöka gå ner mot noll grader.



Figur 4.11: Vridningen i överkroppen för åkare 2 (dubbelaxel), inget hopp godkänt.

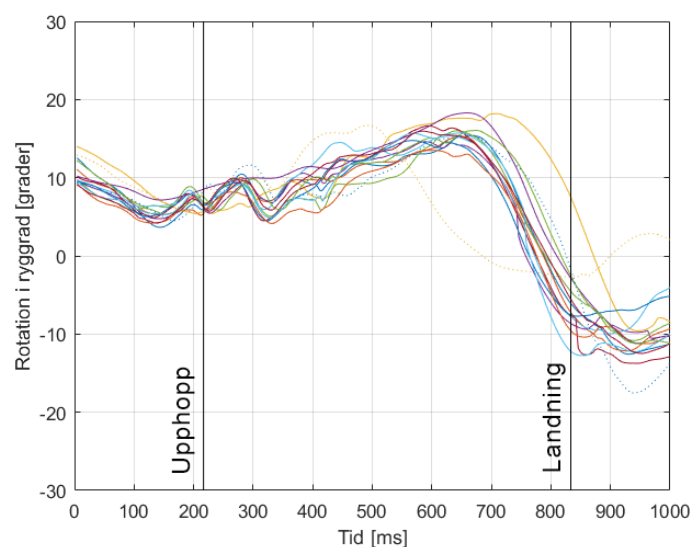
4.2.3 Åkare 3

Ryggvridningen för åkare 3 visas i figur 4.12. Den startar på tio grader vänsterställd och går nära noll grader när personen närmar sig upphoppningspunkten. Vid upphopp är hållningen noll till fem grader åt vänster för att till halva hoppet gradvis öka till en topp nås mellan 10 och 15 grader. Efter det högerställs kroppen för att nå en femgradig högerställning vid landning som vidbehålls grafen ut.



Figur 4.12: Vridningen i överkroppen för åkare 3 (enkelaxel), alla hopp godkända.

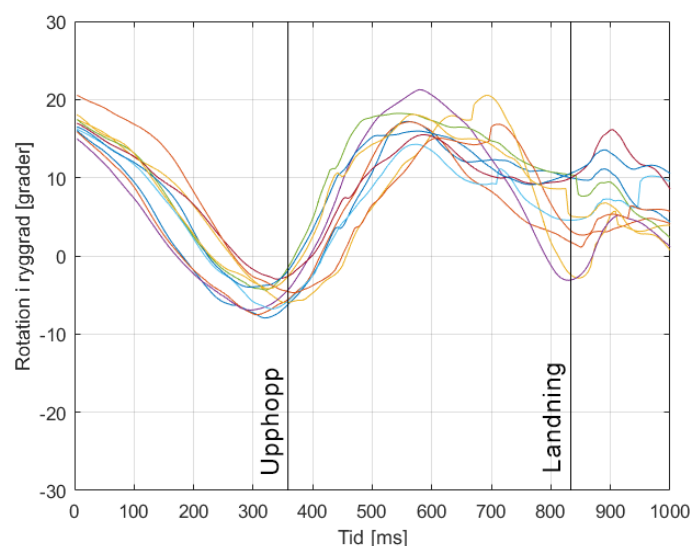
Åkare 3 klarade även hoppa dubbla axelhopp, se figur 4.13. Personen kommer in i hoppet med en tiogradig vänsterställd hållning. Runt upphopp så sker små svängningar för denna hållning men kort därefter ökar den gradvis för att toppa vid två tredjedelar av hoppet runt 15 grader. Efter denna topp högerställs kroppen snabbt innan landning som sker vid fem till tio grader. Kroppen fortsätter vrida sig till tio grader efter landning och vidbehålls hoppet ut. De hoppen åkaren inte klarade märker ut sig i grafen också. Vid det första misslyckades hoppet som illustreras av den gula prickiga linjen, ligger vridningen högre än tidigare hopp. Efter denna topp dalar kurvan snabbt mot en rak (nollgradig) kropp för att sedan lägga sig där. Det andra misslyckade hoppet (blå prickig linje) toppar lite i början för att sedan följa hoppet till slutet efter landning där kroppen vrider sig längre än tidigare hopp ner till en högerställning på 15 grader.



Figur 4.13: Vridningen i överkroppen för åkare 3 (dubbelaxel), delvis godkända hopp. De godkända hoppen illustreras med heldragna linjer medan de icke godkända illustreras med prickiga linjer.

4.2.4 Åkare 4

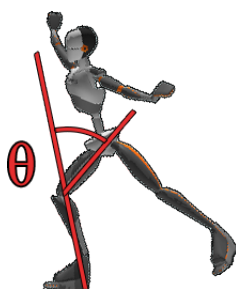
Åkare 4 hoppade också enkelaxel, ryggvridningen kan ses i figur 4.14. Personen kommer ifrån en vänstervriden kropp till en smått högerställd hållning på fem grader vid upphoppet. Därefter vänsterställs ryggen och toppar mellan 10 och 20 grader när halva hoppet är klart. Sedan vrids den tillbaka till mellan tio och noll grader lagom till landning.



Figur 4.14: Vridningen i överkroppen för åkare 4 (enkelaxel), alla hopp godkända.

4.3 Vinkel i höger knäled under landning

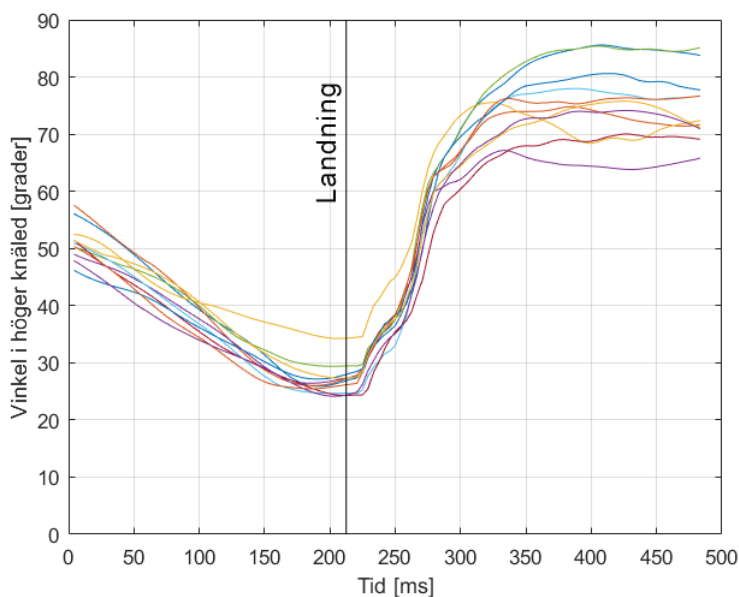
När åkare landar så dämpar de fallet med höger ben genom att böja på det till en viss gräns innan de ställer sig upp igen. Under denna böjningstid så absorberas stöten från hoppet in i åkaren i form av en impulsstöt. Denna stabiliseringsstid kan erhållas genom att studera grafer för höger knäs böjning under landning, se figur 4.15. Noll grader definieras av sensorerna som det raka benet personen hade under kalibrering. Detta innebär att ett överspant ben vid vissa kalibreringar kan resultera i negativa vinklar.



Figur 4.15: Hur vinkeln i höger knäled under landningen är definierad.

4.3.1 Åkare 1

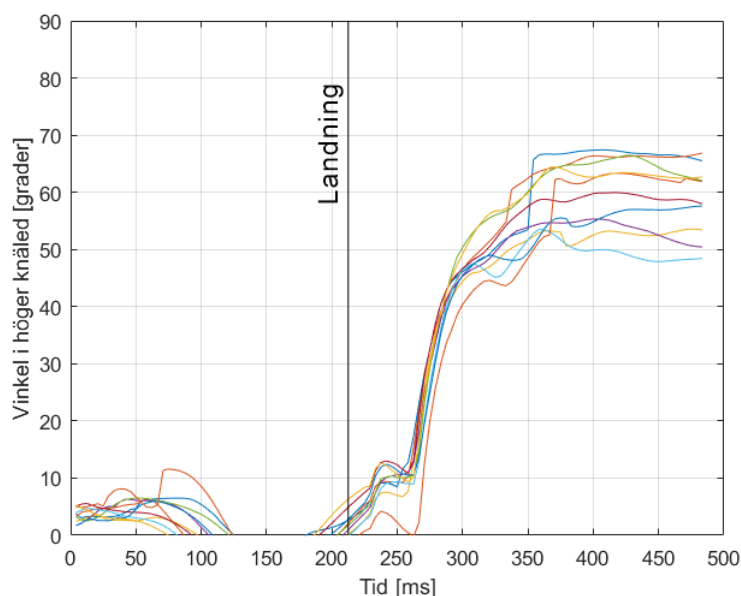
Vinkeln hos högerknät tillhörande åkare 1 kan ses i figur 4.16. Personen landar med en knävinkel mellan 25 och 30 grader. Därefter ökar vinkeln snabbt för att plana ut lite efter 40 ms och sedan snabbt dra iväg upp igen. Efter 70 ms börjar det plana ut igen för att helt ha stabiliserat sig efter 120 ms på en vinkel mellan 65 till 85 grader.



Figur 4.16: Skillnader i knävinkel för åkare 1 (enkelaxel).

4.3.2 Åkare 2

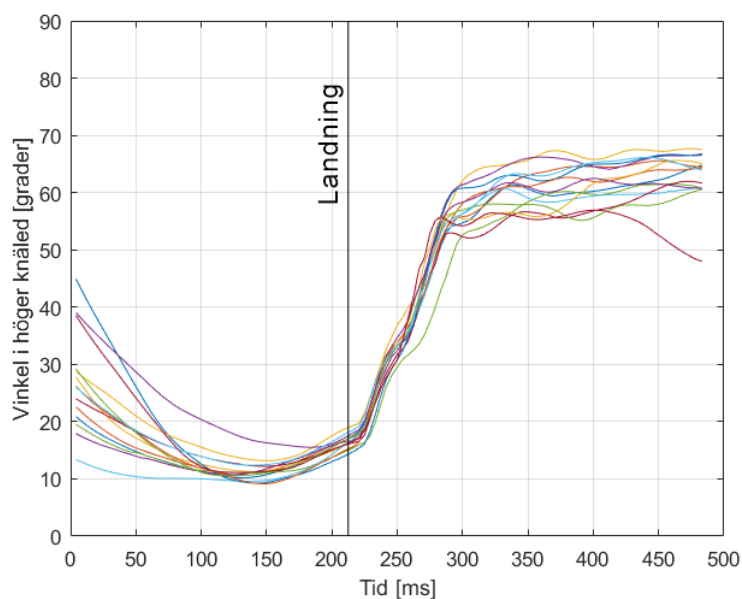
Åkare 2 klarade flertalet enkelaxel som alla uppvisar ett likande mönster, se figur 4.17. Från landningen ökar vinkeln i knä för att sedan dippa lite runt 30-40 ms efter landning, innan vinkeln skjuter iväg igen. Vid 45 grader börjar kurvorna avta tills de blir mer konstanta mellan 50 och 60 grader. Det är oklart när åkaren når ett stabilt knäläge men uppskattningsvis mellan 100 till 150 ms efter landning.



Figur 4.17: Skillnader i knävinkel för åkare 2 (enkelaxel).

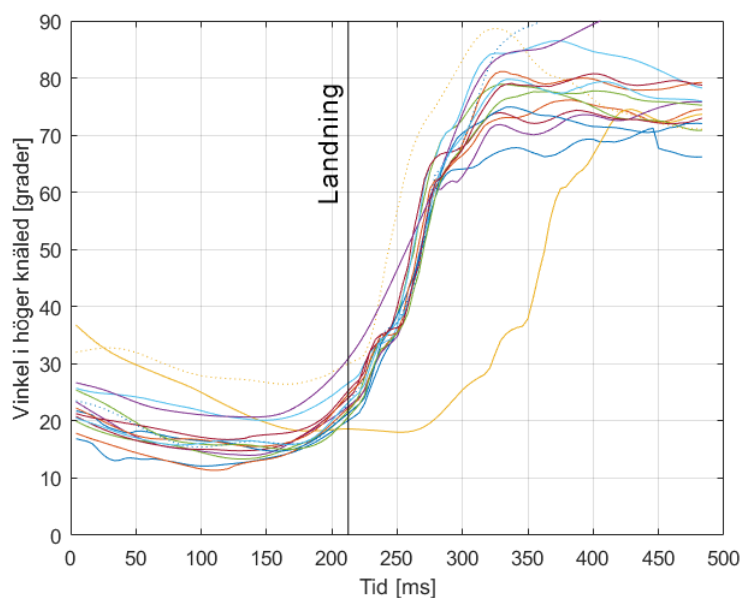
4.3.3 Åkare 3

Åkare 3 som klarade enkla och dubbla axelhopp ger en jämförelse över hur knäleden skiljer sig åt mellan hoppen, se figur 4.18 och figur 4.19. För enkelaxel så ökar knäleden snabbt i vinkel efter landningen. Efter ungefär 30-40 ms så kan en liten förändring i vinkelhastighet märkas för att sedan återgå till samma branta vinkel förändring. Vinkeln planar ut ungefär 80-90 ms efter landning på en vinkel mellan 55 till 65 grader. Vinkeln vid landning ligger mellan 15 och 20 grader.



Figur 4.18: Skillnader i knävinkel för åkare 3 (enkelaxel).

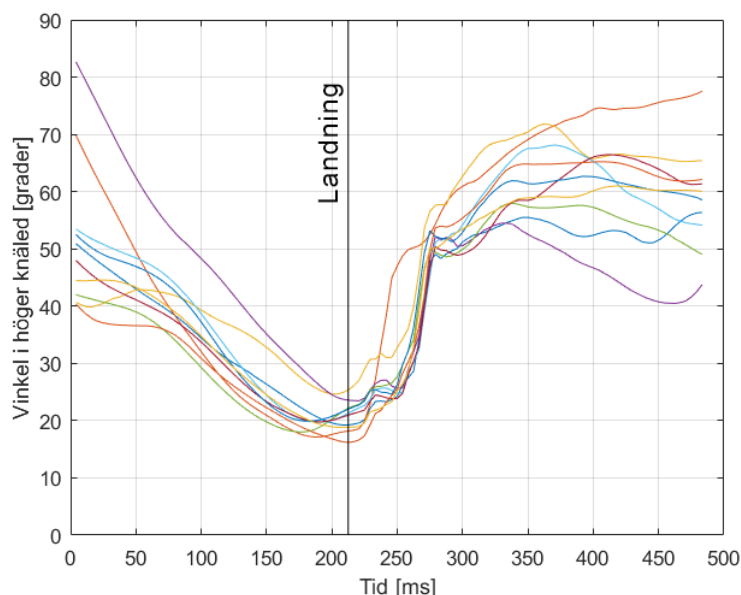
Dubbelaxel för åkare 3, se figur 4.19, är väldigt lik enkelaxel. Precis som innan så stannar hastigheten upp lite efter 30-40 ms, vid dubbelaxel är denna plattå tydligare att se. Utplaningen sker efter ungefär 110 ms fast vid en högre vinkel, mellan 65 och 80 grader. Vinkeln vid landning ligger mellan 20 och 25 grader.



Figur 4.19: Skillnader i knävinkel för åkare 3 (dubbelaxel).

4.3.4 Åkare 4

Åkare 4 hoppade enkelaxel, se figur 4.20 för dennes vinklar. Vid upphoppet ligger knävinkeln runt 20 grader. Efter 30-40 av vinkelökning sjunker vinkeln hastigt för att sedan fortsätta öka. Stabilisering sker efter ungefär 130 ms på vinklar mellan 55 till 70 grader.



Figur 4.20: Skillnader i knävinkel för åkare 4 (enkelaxel).

4.3.5 Beräkningsresultat relaterat till hopphöjd och impuls-kraft vid landning med avseende på stabiliseringstid

Varje åkare som åkt har haft en väldigt konstant hopptid, med en differens på endast ett tiotal milisekunder mellan de olika hoppen. Olika åkare hoppar olika högt dock vilket påverkar hur hög vertikal hastighet de har när de landar, dessa presenteras i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Tabell med medeltiden som varje åkare spenderar i luften.

Åkare	Medeltid i luften [ms]
Åkare 1 (Enkelaxel)	589.4
Åkare 2 (Enkelaxel)	421
Åkare 3 (Enkelaxel)	621.5
Åkare 3 (Dubbelaxel)	617.5
Åkare 4 (Enkelaxel)	475.1

Då halva tiden i luften spenderats med att falla med endast jordens gravitation kan sluthastigheten som åkaren upplever erhållas genom att multiplicera gravitationen

med tiden det tar att falla. Sträckan som man färdats (höjden) fås genom att integrera samma ekvation. Den beräknade medelhöjden och sluthastigheten presenteras i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Tabell med medelhöjden som åkaren hoppar och sluthastigheten de har precis innan kontakt med marken.

Åkare	Beräknad medelhöjd [m]	Beräknad hastighet [m/s]
Åkare 1 (Enkelaxel)	0.4246	2.8940
Åkare 2 (Enkelaxel)	0.2176	2.0671
Åkare 3 (Enkelaxel)	0.4741	3.0516
Åkare 3 (Dubbelaxel)	0.4681	3.0319
Åkare 4 (Enkelaxel)	0.2771	2.3327

Olika personer tar emot på olika sätt med sitt ben också vilket leder till olika stabiliseringstider, det vill säga hur lång tid det tar att gå från maximal vertikal hastighet till att stanna, denna kan erhålls från graferna för vinkeln hos höger knä vid landning. Förutsatt att impulsen kan anses vara över när vinkeln i höger knä blivit stabil så kan kraften som verkar på åkaren fås ut, se ekvation 2.14. Beräknade värden på kraften för varje åkare presenteras i tabell 4.3.

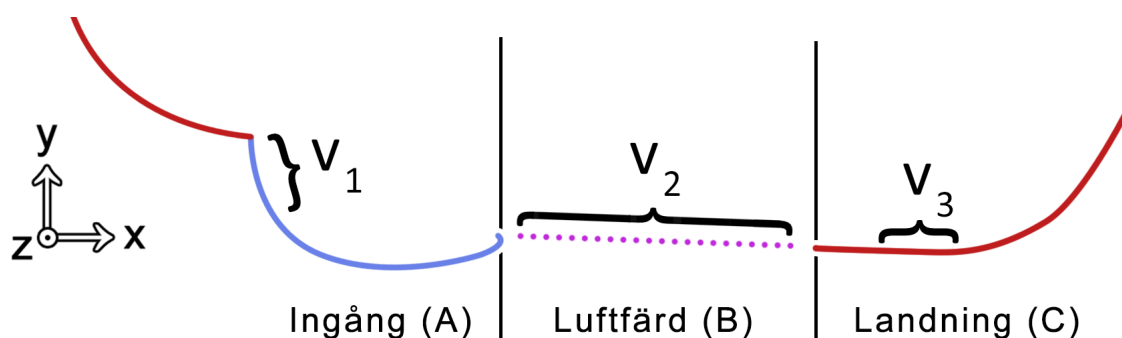
Tabell 4.3: Tabell med stabiliseringstid och uträknad kraft per kg som åkaren utsätts för vid landning.

Åkare	Stabiliseringstid [ms]	Kraft per kg [F/kg]
Åkare 1 (Enkelaxel)	120	24.1163 (2.4558g)
Åkare 2 (Enkelaxel)	150	13.7807 (1.4033g)
Åkare 3 (Enkelaxel)	100-120	27.7415 (2.8250g)
Åkare 3 (Dubbelaxel)	110	27.5630 (2.8068g)
Åkare 4 (Enkelaxel)	130	17.9442 (1.8273g)

4.4 Medelhastigheter under hoppet

Medelhastigheter under hoppen togs fram från tre olika intervall under hoppet.

- Medelhastigheten precis efter avstamp innan uppladdning av rotationen inför upphoppet. Denna mättes från när avstampfoten lämnar marken till att samma fot når ett högsta läge innan uppladdningen för hoppet börjar, se figur 4.21 under v_1 . Denna hastighetssträcka valdes för att den bör vara ren rörelseenergi (ingen rotationshastighet). Efter denna lilla sträcka svänger åkaren mycket mer vilket också gör hastighetsavläsning svår.
- Medelhastigheten som färdas under själva luftfärden från avhopp till landning. Denna mättes genom att ta sträckan och tiden mellan att sista skridskon lämnade marken till första kontakt av isen igen, se figur 4.21 under v_2 .
- Medelhastigheten efter landning när kroppen stabiliserats. Denna hastighet mäts under landningsdelmomentet med start från när benen passerar varandra till liten sträcka efter markkontakt, se figur 4.21 under v_3 .

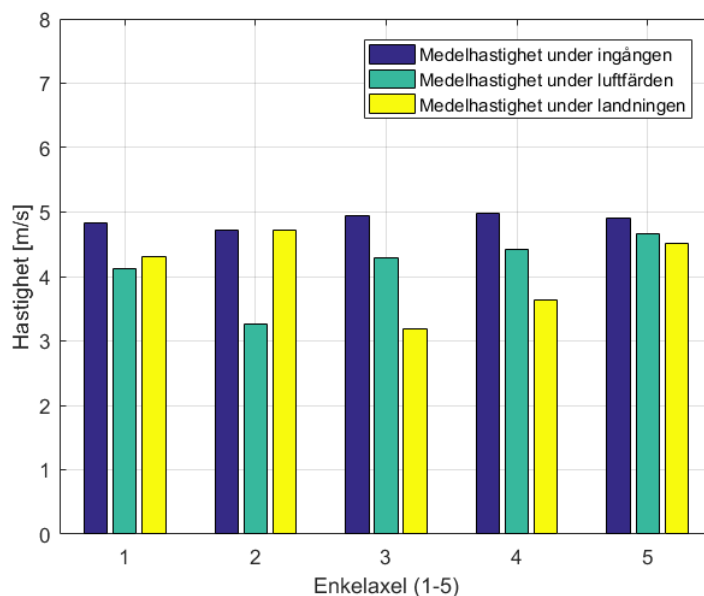


Figur 4.21: Var de tre undersökta medelhastigheterna tagits ur hoppen, vy ovanifrån

Nedanför presenteras ovanstående data för tre åkare. Endast hopp som varit tillräckligt tydliga för att mäta alla tre medelhastigheter på är med, därav är inga misslyckade hopp med då medelhastigheten efter hoppet oftast faller bort vid misslyckat hopp. Graferna har alla individuella hopp och visar tre staplar, där de olika staplarna representerar delmomenthastigheterna v_1 , v_2 och v_3 i kronologisk ordning.

4.4.1 Åkare 2

I figur 4.22 visas hastigheterna för åkare 1 som lyckades med enkelaxel. Medelhastigheten efter avstampet är som högst och ligger generellt för alla hoppen stadigt strax under 5 m/s. Medelhastigheten under luftfärden varierar över alla hoppen men den är i alla hoppen mindre än avstamphastigheten, den varierar från 3 m/s till strax under 5 m/s. Medelhastigheten efter hoppet varierar grovt från att vara mycket högre än hopphastigheten, till att vara ungefär lika stor och till att vara mycket lägre. Denna varierar precis som föregående mellan 3 m/s till precis under 5 m/s.

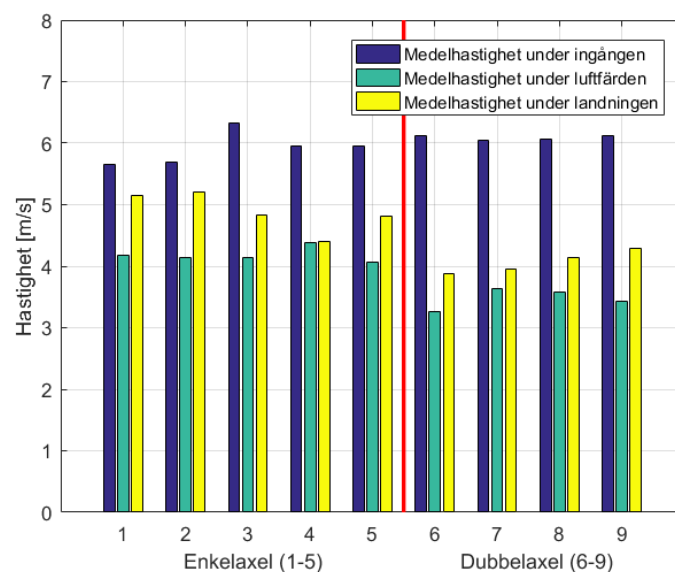


Figur 4.22: Skillnader i medelhastighet under hoppets tre olika delmoment för åkare 2 (enkelaxel).

4.4.2 Åkare 3

Åkare 3 utförde tillräckligt bra enkla och dubbla axelhopp för att erhålla hastigheter för bägge slags hopp, data för dessa visas i figur 4.23. Precis som föregående åkare så är medelhastigheten högst efter avstamp innan upphopp för båda typerna av hopp. De 3 första hastigheterna varierar lite medan de senare enkelaxel samt alla dubbelaxel ligger stabilt runt 6 m/s. Medelhastigheten under luftfärden sjunker betydligt till strax över 4 m/s för enkelaxel medan luftfärdshastigheten för dubbelaxel varierar runt 3.5 m/s.

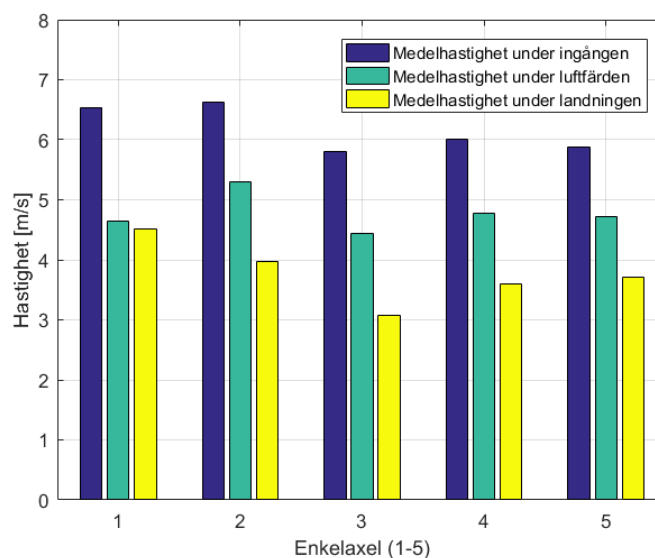
Hastigheten under landning blir för alla prover högre efter landningen med undantag för axelhopp nummer 4 som är lika stor. Denna ökningen i hastighet varierar mycket men kan uppfattas som större i de mesta fallen för enkelaxel och mindre för dubbelaxel. För enkelt axelhopp ligger denna hastigheten på runt 5 m/s (med undantag för hopp nummer 4). Dubbla axelhopp ökar samtliga men varierar här runt 4 m/s istället.



Figur 4.23: Skillnader i medelhastighet under hoppets tre olika delmoment för åkare 3 (enkel- och dubbelaxel).

4.4.3 Åkare 4

Som figur 4.24 visar så varierar avstampshastigheten hos åkare 4 från lite under 6 m/s till 6.5 m/s. Väl under luftfärden så sjunker de flesta hastigheterna till strax under 5 m/s. I majoriteten av hoppen så sjunker denna hastigheten ytterligare under själva landningen till mellan 3 m/s till 4 m/s.



Figur 4.24: Skillnader i medelhastighet under hoppets tre olika delmoment för åkare 4 (enkelaxel).

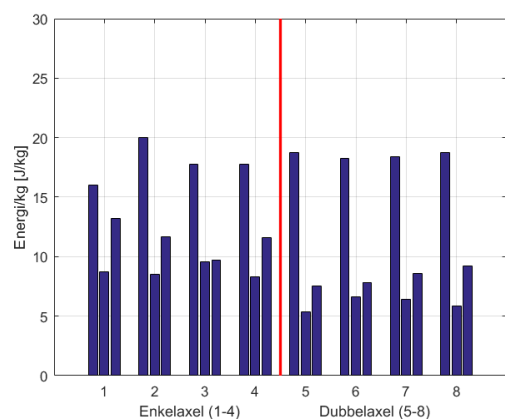
4.5 Energibalans av rörelseenergi, rotationsenergi och potentiell energi under en åkares hopp

Detta avsnitt presenterar resultatet från en energibalansberäkning som sker under en åkares hopp. Denna balansräkning har utförts på åkare 3 som fick flest användbara hastighetsresultat med både enkla och dubbla axelhopp. Energibalansen som undersöks är den som presenteras i figur 2.3. Alla energitermer som presenteras är med enheten Joule per kilogram $[J/kg]$ för att undvika låsa resultatet till en specifik vikt.

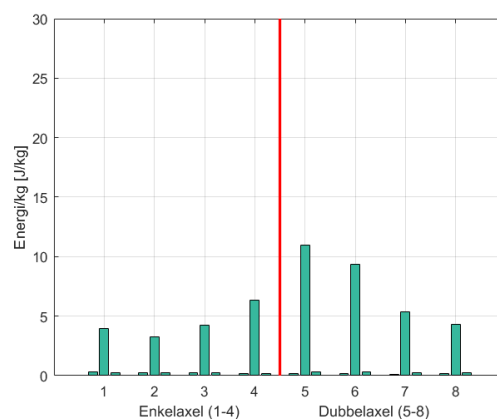
Resultatet presenteras i grafer med tre staplar för varje hopp. Varje stapel representerar ett visst delmoment under hoppet. Dessa delmoment motsvarar de som presenteras i figur 4.21 och som användes för presentation av medelhastigheterna. Första stapeln representerar energierna precis när åkaren tagit fart inför upphoppet. Den andra stapeln är energin när åkaren är på den högsta punkten i hoppet. Den tredje stapeln representerar energin en kort tid efter landning när åkarens kropp har stabiliserat sig. De tre delmomenten för de tre olika energityperna för åkare 3 presenteras i figur 4.25.

Resultatet visar att åkare 3 har som högsta rörelseenergin under delmoment 1 och att den minskar tills delmoment 2 för att sedan öka igen till delmoment 3 i de flesta hoppen. Den högsta rotationsenergin finns i delmoment 2 under luftfärden medan den i princip är obefintlig under de andra två momenten. Den potentiella energin är ganska konstant under alla hoppen och finns bara i delmoment 2 då åkaren befinner sig i luften under denna del. Jämförelsevis mellan enkel- och dubbelaxel så verkar dubbel ha en allmänt högre rotationshastighet i delmoment 2 medan rörelseenergin verkar lägre i delmoment 2 och 3 jämfört med enkelaxel.

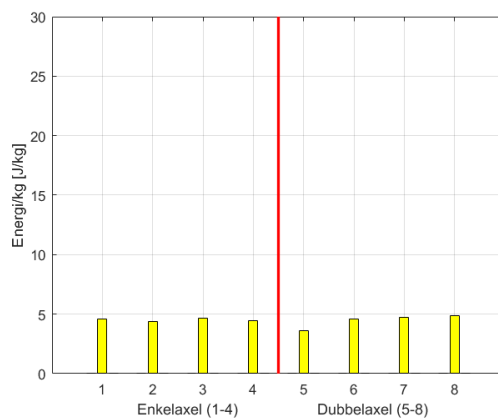
Addition av rotationsenergi och rörelseenergi presenteras i figur 4.26(a), addition av alla energitermerna i varje delmoment presenteras i figur 4.26(b). Resultatet för rörelseenergi plus rotationsenergi ger att delmoment 2 blir det näst högsta i de flesta hoppen efter delmoment 1. Addition av samtliga energitermer ger att delmoment 2 blir högst i vissa hopp men fortfarande hamnar under delmoment 1 i andra hopp. För presentation av medelvärde av alla enkla axelhopp kontra medelvärde för alla dubbla axelhopp se figur 4.27. Medlet visar att den totala medelenergimängden mellan de båda typerna av hopp knappt skiljer sig åt för delmoment 1 och delmoment 2. Rörelseenergi i delmoment 1 och potentiell energi i delmoment 2 verkar också vara konstanta på de båda typerna av hopp. Rörelseenergi i delmoment 2 och 3 är lägre i dubbelaxel än i enkelaxel. Medelrotationsenergi är också större i dubbelaxel än enkelaxel.



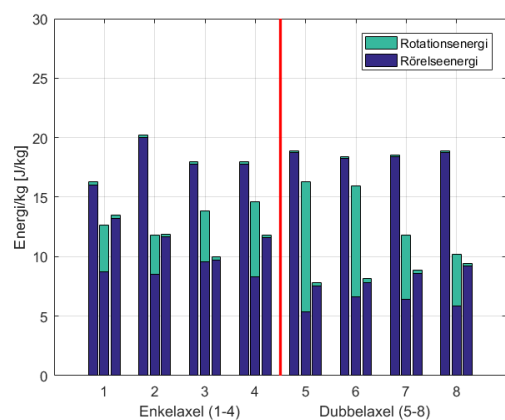
(a) Rölseenergi



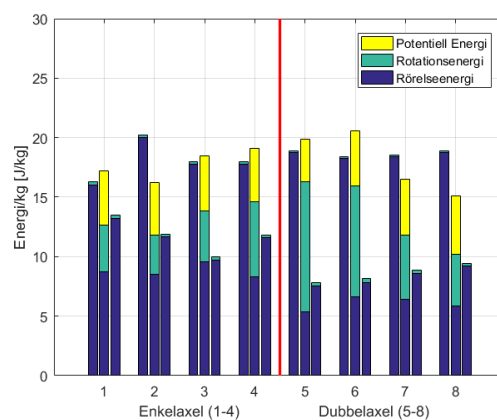
(b) Rotationsenergi



(c) Potentiell Energi

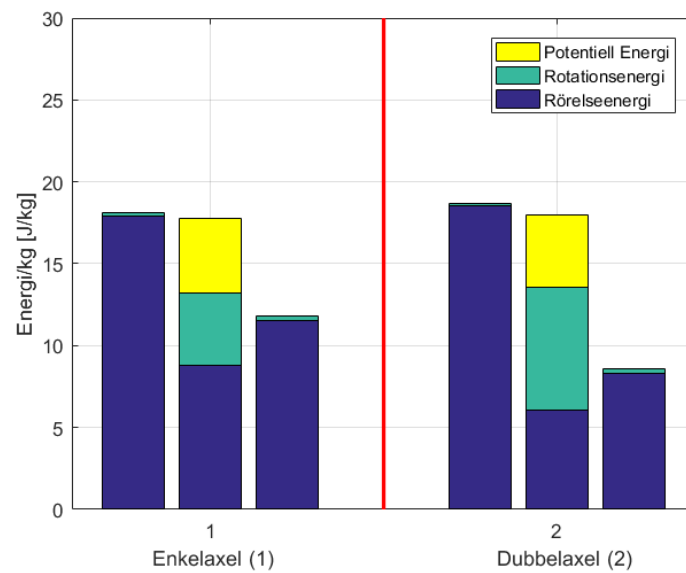
Figur 4.25: Rölseenergi, rotationsenergi och potentiell energi över åtta hopp.

(a) Rölseenergi + rotationsenergi



(b) Alla tre energitermer

Figur 4.26: Addition av olika energitermer för åkare 3.



Figur 4.27: Medelvärde av energisumman i enkelt- och dubbelt axelhopp för åkare 3

5

Diskussion

I diskussionen förklaras och kommenteras rapportens metod samt resultat. Avsnittet innehåller en kritisk granskning av arbetet samt reflektioner kopplade till problemformuleringen och arbetets syfte.

5.1 Metoddiskussion

I metoddiskussionen diskuteras tillvägagångssättet för mätningarna som genomfördes samt var och en av de två olika datainsamlingsmetoderna.

5.1.1 Mätningar

Mätningarnas och systemets utformning kan ha påverkat åkarens förmåga att utföra hoppen på samma sätt som de hade gjort under vanliga omständigheter. Åkarna genomförde många hopp och det gjorde att trötthet uppstod. Detta var något som tros ha inverkan på mätresultaten. Några av åkarna vilade något mellan hoppen och det kan göra att de hopp som utfördes efter vila hade högre kvalitet än de de hopp som genomfördes utan paus. En del utav åkarna blev även nervösa inför mätningarna vilket påverkade deras utförande.

5.1.2 Datainsamling och bearbetning med Xsens

Projektet bygger på de två tidigare kandidatarbeten som genomförts på Chalmers tekniska högskola vilka beskrivs i kapitel 2.3. Att det bygger på tidigare års arbeten har bidragit till både för- och nackdelar. Det första arbetet från 2016 gjorde att Xsens-systemet köptes in. I det andra arbetet från 2017 användes systemet för att samla in data. Systemet uppdateras kontinuerligt vilket gjorde att det till detta projekt innehöll nya uppdateringar. Den data som tidigare år har samlats in blev därav svåransvänd och i flera fall helt oanvändbar.

För att bearbetningen av data skulle påbörjas snabbare hade insamlingen behövt startats tidigare, vilket hade varit beroende tillgängligheten utav åkare samt tillgången till is. Det hade också varit möjligt att studera den tidigare insamlade data och de parametrar som då fanns, trots att det krävdes mer tid, men det hade bidragit till att andra infallsvinklar och tidigare ostuderad information hade gått miste om.

Link-systemet krävde att ett batteri och ett bodypack placerades vid ländryggen, se figur 3.2. Dessa adderade en extra vikt till åkaren vilket kunde tänkas påverka

åkaren negativt. Efter samtal med användarna utav systemet beslutades att det var så lite att det inte påverkade något avsevärt. Det fanns dessutom farhågor att åkaren skadar sig om denne faller och landar på batteriet eller bodypaket, men då det är inslutet i dräkten ansågs det inte vara en stor risk.

Innan Xsens-systemet kunde användas behövde kalibrering, se kapitel 3.1.2.2, genomföras. Kalibreringen gjordes med skridskor på vilket gjorde det svårt att gå naturliga steg. Att kalibreringen gjordes med skridskor skulle kunna bidra till att kalibreringen blev något sämre än om den skulle ha gjorts utan skridskor. För att minimera kalibreringsfelet utfördes den utanför isen, som gjorde det lättare att ta naturliga steg än om den skulle göras på is.

Den insamlade datan kan även ha mätfel. Mätfelen kan bero på olika saker så som att sensorerna kan ha flyttat på sig under hoppet. För att minska denna typ utav felmätningar kan en kontroll ske, efter ett antal hopp, för att se så att sensorerna sitter rätt. Om de har flyttat på sig kan det även vara nödvändigt med en ny kalibrering.

5.1.3 Datainsamling och bearbetning av video

I bearbetning av videodata, kapitel 3.2, beräknas medelhastigheterna för ingång, luftfärd och landning, se kap 2.1 för beskrivning utav respektive del. För att beräkna dessa hastigheter krävdes en differens i tid och en i avstånd. Nedan kommenteras tillvägagångssättet för att ta fram differenserna samt vilka felkällor som kan ha uppstått.

5.1.3.1 Felkällor under uppskattning av tid i videoanalys

Videon begränsas med att ha en fast bildhastighet på 25 rutor per sekund (fps). Kamerorna som användes filmade med olika bildhastigheter vilket betyder att den ena källklippet har en två gånger så hög frekvens som det andra. I praktiska termer betyder det att den verkliga bildrutan man vill mäta ifrån ligger mellan två andra rutor och på så sätt uppstår ett fel i framtiden tid. Detta felet blir som störst två rutor. Då det färdigredigerade klippet har en halverad hastighet blir det maximala felet på så vis 40 ms.

5.1.3.2 Felkällor under uppskattning av avstånd i videoanalys

Den uppskattade differensen av avståndet har också en hel del felkällor att ta hänsyn till. Under hoppet uppskattas sträckan från där ena foten lämnar isen till där den andra foten sätts i. Det kan ifrågasättas hurvida det är ett bra sätt att mäta avstånd på då det mäter på två olika kroppsdelar. Om överkroppen lutar framåt vid upphoppet och bakåt vid landning kanske inte överkroppen färdats lika snabbt som fötterna.

Det kan även uppstå fel när antalet linjer åkaren förflyttar sig under hoppet skall uppskattas ifrån videorna. När en åkares fot träffar isen gör den inte alltid det på en linje utan någonstans mellan två linjer. När skridskon lämnar eller träffar isen

mellan två linjer uppskattas avståndet. Felet kan uppstå i både x och y riktning och maxfelet kan uppskattas vara cirka 10 cm vilket motsvarar mellan rummet mellan två linjer. Det ger ett maximalt diagonalt fel på cirka 14 cm. Felet anses ha en liten inverkan vid beräkningarna utav hastigheter under luftfärden då hopplängden ofta är över två meter lång och sker under en relativt lång tid jämfört med de beräknade hastigheterna i ingången och landningen.

Vid beräkningar utav hastigheterna i ingången och landningen utav hoppet kan det också uppstå fel. Åkaren skär isen i ingången i olika stora bågar. Genom att beräkna hastigheterna för en kort sträcka utav bågen kan avståndet antas vara rakt. I verkligheten blir hastigheten något högre beroende på hur mycket bågen kröker sig.

5.2 Resultatdiskussion

Efter att data samlats in, bearbetats och analyserats kunde resultat presenteras. Resultaten som det här projektet resulterat i diskuteras nedan.

5.2.1 Rotationshastigheter

I resultatet påvisades att det uppstår ett lokalt minima i rotationshastighets grafen för åkare 1 och 3. Genom resonemang med tränare samt noggrann studie utav de inspelade videorna antas fallet uppstå då åkaren byter läge från det ben som används vid upphoppet till det ben som sätts i vid landning. För noggrann beskrivning utav hoppet se kap 2.1.

Det antal grader som detta lokala minima motsvarar i förhållande till det totala gradtalet på hela kurvan illustreras i figurerna 4.4 och 4.5. En hypotes var att om minimat kunde minimeras skulle det generera en större area och på så sätt också bidra med fler grader till hoppet. Studien påvisar att minimat är en så liten del utav hela arean vilket gör att om den reduceras kommer det endast att addera några få grader till hoppet. De få graderna skulle kunna vara viktigt runt gränsen mellan ett lyckat samt ett misslyckat hopp men det bör kunna erhållas genom en ökad hopphöjd eller minskat tröghetsmoment istället.

Att hastighets minimat uppstår i hoppen för tre utav åkarna kan bero på att åkare 2 har en annan hopptechnik. Tekniken kan variera mellan åkare med olika åldrar och kön. Ett resonemang är, som tidigare nämnts, att åkare 1, 2 och 3 böjer knäleden i sitt upphoppsben och behöver byta tyngdpunkt i luften. Men som en grund lär sig åkarna till en början att påbörja luftfärden med ett rakt upphoppsben. Det gör att åkaren inte behöver byta tyngdpunktsläge, vilket skulle kunna vara en anledning till att rotationshastigheterna inte har något tydligt lokalt minima.

Från rotationshastigheterna kunde studien även påvisa att den maximala rotationshastigheten var högst för åkare 2. Hur hög den maximala rotationshastigheten hos åkaren är kan bero på åkarens storlek. För en mindre åkare kan det antas att den elliptiska cylindern som används i beräkningar utav tröghetsmomentet, vilket be-

skrivs i metod avsnitt 3.3.1.2, är mindre än för en större åkare. I bilaga A visas det att tröghetsmomentet beror på åkarens kroppsform samt massfördelning kring axeln.

Arean under kurvan för rotationshastigheterna antogs tidigt representera den area som krävs för ett visst hopp. Efter att den beräknades i fig 4.4 och 4.5 påvisades att det saknades mellan 100 och 200 grader för ett fullbordat axelhopp. Det kan bero på att rotationen redan är påbörjad innan åkaren lämnar isen samt att den slutförs efter att skridskon har satts i isen. Därav var de definierade upphopps- och landningspunkterna mindre representativa för dessa grafer. För att undersöka de totala gradtalen för hoppen skulle de definierade upphopps- och landningspunkterna kunna flyttas, men osäkerheten kring att hitta konsekventa och allmängiltiga punkter skulle spela in för resultatet.

5.2.2 Vinkel i ryggraden relativt höften under hoppet

Vinkeln i ryggraden varierar kraftigt från åkare till åkare. Åkare 2 föredrar till exempel att högerställa sig i början av hoppet, åkare 1 och 4 föredrar att vänsterställa sig i början medan åkare 3 verkar ligga nästan hela hoppet i en vänstervriden position. Vinkeln i ryggen efter landning verkar inte heller spela någon avgörande roll då de olika åkarna lägger sig på allt ifrån 10 grader åt höger till 10 grader åt vänster.

Jämför man graferna för ryggrotation och rotationshastighet från kapitel 4.1 för åkare 2 så kan man se att rotationshastigheten toppar vid 150 ms vilket är då åkaren toppar i rygggradsrotationen åt höger. Liknande observationer kan göras med åkare 1 och 3. När ryggen är som mest vänsterställd har de även den högsta rotationshastigheten så en direkt koppling kan finnas där emellan. Detta kan urskiljas hos åkare 4 också men där är det otydligare. Detta kan också förklara varför grafen för rotationshastigheten skiljer sig åt för åkare 2 gentemot de andra åkarna. Övergången från högerställd position till vänsterställd position efter upphopp ger en drastisk ökning av rotationshastigheten och därför spikar grafen mycket högre än de andras. Den hastiga tillbakavridningen åt vänster direkt efter gör dock att rotationshastigheten snabbt stannar av.

En annan intressant observation hittades i grafen över dubbelaxel hos åkare 3 som visar två misslyckade hopp. Dessa hopp sticker båda ut mycket tidigt i grafen i form av att åkaren roterar lite för mycket till vänster i båda fallen. Då antalet misslyckade hopp är så få är det dock svårt att säga om detta är en bidragande orsak till att just dessa hoppen misslyckades.

5.2.3 Vinkel i höger knäled under landning och impuls kraft

Vid landningen måste benet böjas för att kunna dämpa stöten som kommer från att hoppa. Ju längre tid denna böjning tar desto mer utspridd bör kraften bli från landningen. Om stabiliseringstiden är den tid det tar från att kontakt fås med marken till benet har en stabil vinkel så har åkare 2 och åkare 4 de längsta tiderna på 150 ms respektive 130 ms och bör på så sätt ta emot minst krafter per kilogram

vikt, vilket resultatet också pekar på. En notering här är också att de båda hoppar lägre de andra två. Åkare 1 och 3 har lägre tider på 120 ms och 110 ms respektive.

Detta resultat är motsäggande av den anledningen att åkare 1 och 3 kan anses vara de professionella åkarna av de fyra. På grund av detta så kan det tänkas att de ska ha bättre kontroll över sin landning än åkare 2 och 4 och även kunna utföra en landning där benet belastas mindre. Något som pekar på att det kanske är åkare 2 och 4 som gör fel istället är den lilla avtrappningen på samtliga grafer 30 ms till 40 ms efter landning. Detta graffenomen beror troligen på att åkarna sätter i tåspetsen av skridskon först och kort därefter slår i med hela skäret, därav denna dipp. Detta avbrott i vinkelökningen syns i alla grafer men ser mer slät ut i graferna för åkare 1 och 3. Åkare 2 och 4 avbryter sin vinkelökning helt och sjunker till och med ner lite. Detta skulle kunna tolkas som att åkaren utsätts för två separata impulsstötar och på så sätt kanske påverkas av högre totala krafter än vad resultatet visar. I övrigt verkar inte slutvinklarna som benet har efter stabilisering spela stor roll för huruvida åkaren får en längre stabiliseringstid eller inte.

5.2.4 Medelhastigheter under hoppet

Åkarnas avstampshastigheter var alla väldigt konsekventa. Alla tre åkare hade sina avstampshastigheter som de kände sig bekväma med och höll sig runt även om de andar delmoments hastigheterna skiljde sig åt drastiskt mellan hopp. Resultatet för åkare 3 visar även att dennes avstampshastigheter för enkelaxel och dubbelaxel hade samma hastigheter vilket tyder på att starthastighet inte är en parameter man kan ändra för att kunna hoppa andra typer av hopp.

Spekulativt så bör ett hopp som repetitivt hoppas uppvisa liknande hastigheter och parametrar i varje hopp. Åkare 3 som var den mest professionella åkaren hade även det mest konsekventa resultatet gällande detta. I graferna för alla åkare syns att starthastigheten är den högsta. Därefter sjunker medelhastigheten under själva hoppet. Om man tolkar åkare 3 som den korrekta så bör hastigheten efter hoppet sedan stiga igen men inte nå upp till starthastigheten.

5.2.5 Energibalansen

Rörelseenergin har beräknats med ekvation 2.10 där hastigheten är hastigheten från resultatavsnitt 4.4. Denna hastighet är ett medelvärde över en sträcka till skillnad från rotationen och höjden som är diskreta värden. Detta kan resultera i felaktig data under vissa omständigheter. Rotationsenergin beräknas med ekvation 2.11 där vinkelhastigheten är samma som i avsnitt 4.1, värdena har tagits från ungefär mitten av de intervall som hastigheten plockades ifrån vilket bör förbättra trovärdigheten hos resultatet. Tröghetsmomentet som använts finns redovisat i bilaga A. Den potentiella energin räknades ut med ekvation 2.12 där höjden gavs av integralberäkning på tiden varje åkare hade i luften. Energibalansen är endast balanserad efter en åkare vilket kan resultera i väldigt missvisande data för alla konståkare som population i helhet.

Medelvärdet av de enkla axelhoppet kontra medelvärdet av de dubbla axelhoppet

gav en graf, se figur 4.27, som visuellt förklarade differensen mellan de båda typerna av hopp. Dubbla axelhopp kräver en högre mängd rotationsenergi än vad enkla gör vilket är exakt vad grafen visar. Vad som inte är lika självklart är att rörelseenergin är lägre i dubbelaxel än i enkelaxel under själva luftfärden. Då den totala energimängden för delmoment 2 är lika stora för båda typerna av hopp så indikerar detta att differensen mellan rotationsenergierna för enkelaxel och dubbelaxel motsvarar den differens i mängden rörelseenergi som försvinner mellan de båda hoppen. Med andra ord, och förutsatt att datan är trovärdig, så betyder detta att den extra rotationsenergi som behövs för att klara av dubbelaxel tas direkt från åkarens rörelseenergi. Detta kan indikera att enkelaxel också konverterar rörelseenergin för att uppnå rotation men detta kan inte sägas lika säkert då inga inspelningar gjorts på hopp utan rotation.

Att medelvärdesgrafen visar att energimängden i delmoment 1 och delmoment 2 är ungefär lika stora är missvisande då åkaren med största sannolikhet tillför en energimängd från benet under upphoppet mellan dessa moment. Denna tillförda energimängd är som störst förmodligen lika stor som den potentiella energin. Även om tilläggsenergin inte är så stor betyder det att mellan varje delmoment förloras en viss mängd energi. Den energiförlusten som sker mellan delmoment 1 och 2 sker spekulativt på grund av det sista miniskäret för bromsning som åkarna gör innan upphopp. Energin försvinner i form av friktionsvärme till isen isåfall. Denna bromsning skulle även förklara varför så mycket av rörelseenergin försvinner.

En stor mängd energi försvinner också mellan hoppet och landning. Här sker inte ett lika tydligt skridskoskär eller inbromsning som mellan avstamp och hoppet. Ökningen av rörelseenergi mellan delmoment 2 och 3 tyder också på att det inte sker någon inbromsning. Spekulativt så kan denna energi försvinna som förlust i form av att musklerna absorberar det vid landning. Om detta är fallet så tar åkarens kropp mer stryk vid dubbelaxel än vid enkelaxel då mer energi förloras där. Detta är avsevärt och betydelsefullt då båda hoppen har samma höjd och på så sätt borde orsaka samma skador vid landning. För att veta vilken form eller delar av kroppen denna extra energiabsorption påverkar så krävs ytterligare mer utförande studier.

6

Slutsats

Från de studier och analyser som gjorts under projektet har flera parametrar som tros spela roll för utförandet av ett axelhopp funnits. Tidigare studier har påvisat att rotationshastighet är en av de mest betydande parametrarna för ett axelhopp. Under analysen iaktogs att den maximala rotationshastigheten under luftfärden sammanföll med när åkaren vred ryggraden, det vill säga vinkeln mellan axlar och höfter, som mest, detta för både enkla och dubbla axelhopp. Detta skulle innebära att om åkaren kan lära sig att synkronisera sin vridning av överkroppen så att den sammanfaller med en tidpunkt under luftfärden kan ett korrekt antal grader för rotation erhållas.

Skillnaden mellan de uppmätta ingångshastigheterna mellan enkla och dubbla axelhopp för åkare 3 var förhållandevis små. Detta stämde vid jämförande av andra åkares ingångshastigheter också vilket antyder att denna parameter inte är av större betydelse för utförandet av ett enkelt kontra ett dubbelt axelhopp utan är en parameter som är samma för alla hopp.

En direkt korrelation hittades vid jämförandet av medelvärdena hos energitermerna mellan enkel- och dubbelaxel. Denna observation antyder att den extra rotationsenergien som behövs vid dubbelaxel konverteras från rörelseenergin in i hoppet. Detta kan också peka på att en del av rotationsenergin för enkelaxel också kommer ifrån rörelseenergin.

Energibalansen visade också att mer energi försvinner vid landning hos dubbelaxel än hos enkelaxel vilket är markant då båda hoppen hade samma hopphöjd. Denna energi absorberas gissningsvis av musklerna vilket gör dubbelaxel till ett mer påfrestande hopp att utföra, även när åkare lyckas.

Genom att studera fler åkare kan slutsatsen dras att mer erfarna åkare har ett väldigt repetitivt rörelsemönster där skillnaderna mellan de olika parametrarna för hoppen sinsemellan är väldigt små. Däremot har åkare jämfört med varandra säregna rörelsemönster som genererar olika parameterkurvor. Det är därför svårt att avgöra allmängiltiga parametrar som bör förbättras för att utvecklas som åkare.

7

Rekommendationer

Rekommendationer till ytterligare studier på samma område är att verifiera framtagna data genom mer avancerade beräkningsmetoder. Framtida projekt skulle med hjälp av dynamiska simuleringsprogram kunna utreda de energier som uppstår i ett hopp samt göra beräkningar på de krafter som kroppen utsätts för under hoppets olika delmoment. Fokus skulle kunna ligga kring exempelvis upphopp eller landning. Dessa studier skulle kunna leda in på flera olika områden för att utveckla konståkningen som idrott. Dels det materiella där man undersöker möjligheter att utveckla utövarnas utrustning, som skridskoskor och skenor. En annan vinkling man skulle kunna göra är att istället fokusera på hur man med hjälp av rätt form av styrketräning kan förebygga skador.

Fortsatt arbete skulle också kunna syfta till att utreda vilken roll åkarens hållning spelar in för utfallet av ett hopp. Vridningen av överkroppen har i detta projekt visat sig korrelera med maximal rotationshastighet. Frågorna kvarstår dock kring hur denna kunskap går att tillämpa för att utvecklas som konståkare.

Litteraturförteckning

- [1] “Konståkning i Sverige - från skridskoskola till toppåkare - Idrott och konst i skön förening”, Svenska Konståkningsförbundet, [Online], Tillgänglig: http://www.mynewsdesk.com/se/svenska_konstakningsforbundet, [Hämtad 10 maj 2018].
- [2] “Konståkningen Vill: Konståkningens verksamhetside och riktlinjer”, Svenska Konståkningsförbundet, Stockholm, Sverige, 2014. [Online] Tillgänglig: http://www.svenskkonstakning.se/globalassets/svenska-konstakningsforbundet/dokument/om-oss2/rad-och-stod/konstakningen-vill_reviderad-april-2017.pdf [Hämtad: 10 maj, 2018].
- [3] “Figure Skating Training”, Ice skating resources, [Online], http://www.iceskatingresources.org/Figure_Skating_Training.html [Hämtad: 2 februari, 2018].
- [4] “Tekniska Regler, Singelåkning.”, *Svensk Konståkning*, 15 augusti, 2015, [Online], Tillgänglig: <http://www.svenskkonstakning.se/globalassets/svenska-konstakningsforbundet/dokument/tavla2/svenska-regler/iii.-tekniska-regler-singel-15-16.pdf>, [Hämtad: 6 februari, 2018].
- [5] “Hoppskola”, *Skatesweden*, [Online], <http://www.skatesweden.se/konstakningensabc/hoppskola/>, [Hämtad 6 februari, 2018].
- [6] T. Hollingshead, “Figure 8: Skaters feel eight times their body weight when they land a jump.”, *BYU News*, 17 februari 2014. <https://news.byu.edu/news/figure-8-skaters-feel-eight-times-their-body-weight-when-they-land-jump> [Hämtad: 9 februari, 2018].
- [7] I. Andersson, N. Bentzen, M. Engström, J. Hesselund, M. Högföldt, N. Mosawi, “Konståkares hopptechnik”, Kandidatarbete, Maskinteknik, Chalmers Tekniska Högskola, [Online], <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/238938/238938.pdf>, [Hämtad: 9 februari, 2018].
- [8] E. Nyberg, M. Trieu, G. Ölund, “Teknisk analys av konståkningens axelhopp”, Kandidatarbete, Maskinteknik, Chalmers Tekniska Högskola, [Online], <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/250455/250455.pdf>, [Hämtad: 9 februari, 2018].
- [9] “Motion capture”, *Wikipedia*, [Online], Tillgänglig: https://www.en.wikipedia.org/w/index.php?title=Motion_capture&oldid=820735073, [Hämtad: 6 februari, 2018].
- [10] L. Gottschlid, M. Niedfeldt, E. Porter, C. Young, “Sport-Specific Injuries and Medical Problems of Figure Skaters”, 106(6), 2007, [Online], Tillgänglig: http://www.wisconsinmedicalsociety.org/_WMS/publications/wmj/pdf/106/6/330.pdf [Hämtad: 9 februari, 2018].

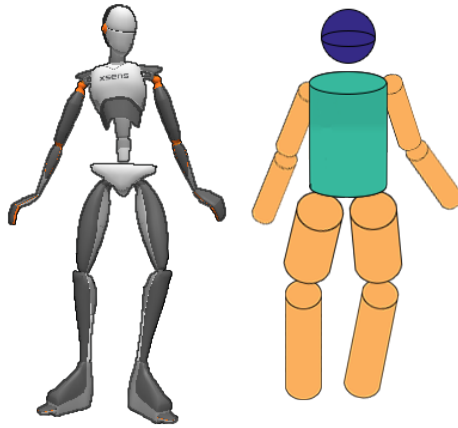
-
- [11] “Ladies Results (2017)”, *International Skating Union*, [Online], Tillgänglig: <http://www.isureresults.com/results/season1718/ec2018/CAT002RS.HTM>, [Hämtad: 6 februari, 2018].
- [12] “Ladies Results (2018)”, *International Skating Union*, [Online], Tillgänglig: <http://www.isureresults.com/results/season1617/ec2017/CAT002RS.HTM>, [Hämtad: 6 februari, 2018].
- [13] “Riktlinjer för barn- och ungdomsidrotten”, *Riksidrottsförbundet*, [Online], Tillgänglig: <http://www.svenskidrott.se/Barnochungdomsidrott/Riktlinjerforbarn-ochungdomsidrotten/>, [Hämtad: 6 februari, 2018].
- [14] “Tröghetsmoment”, *Nationalencyklopedin*, [Online], Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/tröghetsmoment>, [Hämtad: 6 maj, 2018].
- [15] A. Boström, “Rigid body dynamics”, opublicerad, 2015.
- [16] “Rotation Matrix”, *Wolfram MathWorld*, [Online], Tillgänglig: <http://mathworld.wolfram.com/RotationMatrix.html>, [Hämtad: 3 maj, 2018].
- [17] S. M. LaValle, “Yaw, pitch and roll rotations”, Cambridge University Press, april 2012. [Online] Tillgänglig: <http://planning.cs.uiuc.edu/node102.html>, [Hämtad: 6 maj, 2018].
- [18] B. Alfredsson, “Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära”, 11th ed., Stockholm: Instant Book AB, 2014, p. 338.
- [19] “Rotational Kinetic Energy”, *Lumen*, [Online], Tillgänglig: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/rotational-kinetic-energy/>, [Hämtad 14 maj].
- [20] C. German, “Kinetic Energy and Potential Energy”, *Wyzant*, [Online], Tillgänglig: <https://www.wyzant.com/resources/lessons/science/physics/kinetic-and-potential-energy>, [Hämtad: 14 maj, 2018].
- [21] “Rörelsemängd, impuls och stöt”, *Math.se*, [Online], Tillgänglig: http://wiki.math.se/wikis/forberedandefysik/index.php/3.5_R%C3%B6relsem%C3%A4ngd%2C_impuls_och_st%C3%B6t, [Hämtad: 14 maj, 2018].
- [22] A. Kietzig, S. Hatzikiriakosa, P. Englezos, “Physics of ice friction”, *Journal of applied Physics*, vol 107, no 8, januari 2010, [Online], Tillgänglig: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.3340792>, [Hämtad: 15 april, 2018].
- [23] “Avfuktning av ishallar.”, *Munters*, [Online], Tillgänglig: <https://www.munters.com/sv/munters/cases/ice-rink/>, [Hämtad: 13 maj, 2018].
- [24] E. Lozowski, K. Szilder, S. Maw, “A model of ice friction for a speed skate blade”, *Sports Engineering*, vol 16, no 4, december 2013, [Online], Tillgänglig: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12283-013-0141-z>, [Hämtad: 15 april 2018].
- [25] F. M. White, *FLUID MECHANICS, EIGHTH EDITION IN SI UNITS*, 8th ed., New York NY: McGraw Hill Education, 2016, ch. 5, p. 281.
- [26] M. Hon Koo, A. Sh, M. Al-Obaidi. “Calculation of Aerodynamic Drag of Human Being in Various Positions”, Department of Mechanical Engineering, Taylor’s University, Malaysia, 2013. [Online] Tillgänglig: <http://studylib.net/doc/18361520/calculation-of-aerodynamic-drag-of-human> [Hämtad: 24 april, 2018]

- [27] “Medical Definition of Body surface area”, *MedicineNet.com*, 13 maj, 2016. [Online] Tillgänglig: <https://www.medicinenet.com/script/main/art.asp?articlekey=39851>, [Hämtad: 10 april, 2018].
- [28] “Xsens MVN Analyze”, *Xsens.com*, 2016, [Online], <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn-analyze/>, [Hämtad: 10 april 2018].
- [29] B. Alfredsson, “Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära”, 11th ed., Stockholm: Instant Book AB, 2014, pp. 344-349.
- [30] P. de Leva, “Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov’s segment inertia parameters”, Kinesiology Department, Indiana University, Bloomington, USA, IN 47405, 1996, [Online], Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021929095001786> [Hämtad: 25 april, 2018]
- [31] A. Portman, “The Transition”, 2003, [Online], Tillgänglig: <http://andreaportman.tripod.com/averages.html>, [Hämtad: 4 maj, 2018].
- [32] K. M. D. Bushby, T. Cole, J. N. S. Matthews, J. A. Goodship, “Centiles for adult head circumference”, *Archives of Disease in Childhood*, 1992, kap. #67, pp. 1286-1287, [Online], Tillgänglig: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1793909/pdf/archdisch00633-0054.pdf>, [Hämtad: 4 maj, 2018].
- [33] P. Karakas, M. G. Bozkir, “Determination of Normal Calf and Ankle Values Among Medical Students” Department of Anatomy, Faculty of Medicine, Cukurova University, Adana, Turkiet, 2007. [Online] Tillgänglig: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00266-006-0132-6.pdf>, [Hämtad: 5 maj, 2018].

A

Tröghetsmomentsberäkningar

För att underlätta beräkningarna av tröghetsmomenten under axelhoppet förenklades kroppsdelarnas former till enkla geometriska former, enligt figur A.1.



Figur A.1: Hur kroppsdelarna förenklats i beräkningarna.

Totalt användes tio segment, dessa listade i tabell A.1 tillsammans med de tabellerade tröghetsmomenten [29] för respektive koordinataxel. För var och ett av de listade segmenten genomfördes de nedan beskrivna beräkningarna i totalt tre punkter: strax före upphopp, vid tidpunkten då maximal hopp höjd uppnåddes samt strax efter att åkaren landat.

Tabell A.1: Segment och tröghetsmoment

Segment	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
Överkropp	$\frac{1}{4}m_{\bar{o}}b_{\bar{o}}^2 + \frac{1}{3}m_{\bar{o}}L_{\bar{o}}^2$	$\frac{1}{4}m_{\bar{o}}a_{\bar{o}}^2 + \frac{1}{3}m_{\bar{o}}L_{\bar{o}}^2$	$\frac{1}{4}m_{\bar{o}}(a_{\bar{o}}^2 + b_{\bar{o}}^2)$
Huvud	$\frac{2}{5}m_h r_h^2$	$\frac{2}{5}m_h r_h^2$	$\frac{2}{5}m_h r_h^2$
Lår höger/vänster	$m_l(\frac{1}{4}r_l^2 + \frac{1}{12}L_l^2)$	$m_l(\frac{1}{4}r_l^2 + \frac{1}{12}L_l^2)$	$\frac{1}{2}m_l r_l^2$
Vad höger/vänster	$m_v(\frac{1}{4}r_v^2 + \frac{1}{12}L_v^2)$	$m_v(\frac{1}{4}r_v^2 + \frac{1}{12}L_v^2)$	$\frac{1}{2}m_v r_v^2$
Överarm höger/vänster	$m_{\bar{o}a}(\frac{1}{4}r_{\bar{o}a}^2 + \frac{1}{12}L_{\bar{o}a}^2)$	$\frac{1}{2}m_{\bar{o}a}r_{\bar{o}a}^2$	$m_{\bar{o}a}(\frac{1}{4}r_{\bar{o}a}^2 + \frac{1}{12}L_{\bar{o}a}^2)$
Underarm höger/vänster	$m_{ua}(\frac{1}{4}r_{ua}^2 + \frac{1}{12}L_{ua}^2)$	$\frac{1}{2}m_{ua}r_{ua}^2$	$m_{ua}(\frac{1}{4}r_{ua}^2 + \frac{1}{12}L_{ua}^2)$

I formlerna för tröghetsmomenten ingår massorna i tabell A.2 och mått för delkropparna i tabell A.3. Värdena som används för massorna är kroppsdelarnas viktfordelningen hos en genomsnittlig man [30], därav genererar energiberäkningarna termer i enhet (J/kg). Kroppsmåtten som användes är medelvärden tagna från bland annat den mjukvara som användes i projektet, MVN Analyze. Då användaren av programmet preciserar längden på personen som använder Mocap-dräkten generar den längder på bland annat ben och armar, också utifrån medelvärden. Dessa data utnyttjades och kompletterades med diverse andra data.

Tabell A.2: Massfördelning

Segment	Fördelning
Överkropp	$m_{\bar{o}}=0.4346$
Huvud	$m_h=0.0694$
Lår höger/vänster	$m_l=0.1416$
Vad höger/vänster	$m_v=0.0433$
Överarm höger/vänster	$m_{\bar{o}a}=0.0271$
Underarm höger/vänster	$m_{ua}=0.0162$

Tabell A.3: Kroppsmått

Segment	Variabeldefinition	Siffervärden [m]
Överkropp	$L_{\bar{o}}$ = mått mellan axlar och höft $a_{\bar{o}}$ =tjocklek mellan rygg och bröstorg $b_{\bar{o}}$ =avstånd mellan höfter	$L_{\bar{o}}=0.561$ $a_{\bar{o}}=0.150$ [31] $b_{\bar{o}}=0.238$
Huvud	r_h = huvudets radie	$r_h=0.089$ [32]
Lår höger/vänster	r_l = lårets radie L_l = avstånd mellan knä och höft	$r_l=0.082$ [31] $L_l=0.382$
Vad höger/vänster	r_v = vadens radie L_v = avstånd mellan knä och ankel	$r_v=0.058$ [33] $L_v=0.400$
Överarm höger/vänster	$r_{\bar{o}a}$ = överarmens radie $L_{\bar{o}a}$ = avstånd mellan axel och armbåge	$r_{\bar{o}a}=0.053$ [31] $L_{\bar{o}a}=0.352$
Underarm höger/vänster	r_{ua} = underarmens radie L_{ua} = avstånd mellan handled och armbåge	$r_{ua}=0.029$ [31] $L_{ua}=0.352$

Beräkningarna påbörjades genom att ställa upp tröghetstensorn för respektive segment i sitt eget lokala koordinatsystem, likt ekvation A.1 [15]. Eftersom kropparna är symmetriska är det enbart diagonalelementen som inte är nollskilda.

$$I_n = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Eftersom alla parametrar, exempelvis rotationshastigheten från mätningarna är definierade för systemets lokala koordinatsystem krävdes omräkningar av tröghetsmomenten. Genom att använda rotationsmatriser var det möjligt att få fram tröghetstensorerna för det globala koordinatsystemet. Rotationsmatriserna för moturs rotation ses i ekvation A.2 till A.4 [16].

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

För att rotera en kropp i systemet tas den totala rotationsmatrisen fram i enlighet med ekvation A.5 [17]. När denna är framtagen för en specifik kropp, går det att projicera den definierade tröghetstensorerna i det globala koordinatsystemet. Detta genom ekvation A.6 [15].

$$R_{tot}(\gamma, \beta, \alpha) = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) \quad (\text{A.5})$$

$$I_{global} = R_{tot}I_nR_{tot}^T \quad (\text{A.6})$$

Antaganden som gjordes vid beräkningarna var att alla alla segment förväntades ha en jämnfördelad massa, vilket i praktiken innebär att deras masscentrum hamnar centrerat i kroppen. Dessa masscentrum antogs också sammanfalla med de använda sensorernas läge. På det sättet var det möjligt att använda vinkelhastigheterna för segmenten vid beräkningar av rotationsenergierna, utan att använda Steiners sats.

För att beräkna rotationsenergierna togs vinkelhastigheterna i tidigare nämnda tidpunkter fram ur Xsens-programmet. Vinkelhastigheten representeras av en vektor med tre element som beskriver segmentets, exempelvis huvudets, vinkelhastighet kring de globala koordinataxlarna. Formeln för rotationsenergin för segment s följer i ekvation A.7 [15].

$$E_s = \frac{1}{2}\omega^T I_{global}\omega = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix} I_{global} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

B

Matlabkod för tröghetsmoment

```
1
2 clc
3 clear all
4 close all
5 %index_u = [376 115      318      356]; %ondrej EA
6 %index_l=[521 264      464      504];
7
8 index_u = [244 195      211      228]; %ondrej DA
9 index_l = [375 343      361      381];
10 %% body dimensions [m]
11 trunk_thick = 15 * 10-2;
12 hip_width = 23.8 * 10-2;
13 trunk_length = (153.9-97.8) * 10-2;
14 head_radius = (56/(2*pi)) * 10-2; %from average head
    circumference
15 thigh_radius = ((2.54*20.35)/(2*pi)) * 10-2; %from inch to
    cm, circumference to radius
16 thigh_length = (97.8-59.6)*10-2; %from xsens
17 calf_radius = (35/(2*pi))*10-2; %from average calf
    circumference
18 calf_length = (59.6-19.6)*10-2; %knee height minus ankle
    height
19 uarm_radius = (12.99*2.54)/(2*pi) * 10-2; %from inch to cm,
    circumference to radius
20 uarm_length = (178.7-37.8)/4*10-2; %arm span minus shoulder
    width - divided equally between 2 upper arms and 2
    forearms
21 larm_radius = (2.32*2.54)/2*10-2; %inch to cm, diameter to
    radius
22 larm_length = uarm_length;
23
24 %% mass distribution
25 mass_head = 0.0694;
26 mass_trunk = 0.4346;
27 mass_thigh = 0.1416;
28 mass_calf = 0.0433;
29 mass_uarm = 0.0271;
```

```
30 mass_larm = 0.0162;
31
32 fileNames = getFileNames();
33 for a = 1:length(fileNames)
34     % load data from file – code from xsens
35     [tree,nSamples,fileComments,sensorData,segmentData] =
        loadMVNdata(fileNames{a});
36     %% choose one of the following points
37     %index for take off point
38     for i = 4:nSamples
39         knee(i) = tree.subject.frames.frame(i).jointAngle
            (48);
40     end
41
42     [max_knee, index(a)] = max(knee(1:index_u(a)-50));
43
44
45
46     %index for heighest point in jump
47
48     for i=4:nSamples
49         pelvis(i) = tree.subject.frames.frame(i).position(3)
            ;
50     end
51     [max_pelvis, index(a)] = max(pelvis);
52
53
54     %index for landing
55     index(a) = index_l(a) + 70;
56
57
58     %angular velocity
59     omega_trunkTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        angularVelocity(1:3)';
60
61
62     %% trunk
63     %local inertia – origin i bottom of cylinder
64     I_trunkX = 1/4 * mass_trunk * hip_width^2 + 1/3 *
        mass_trunk * trunk_length^2;
65     I_trunkY = 1/4 * mass_trunk * trunk_thick^2 + 1/3 *
        mass_trunk * trunk_length^2;
66     I_trunkZ = 1/4 * mass_trunk * (hip_width^2 + trunk_thick
        ^2);
67
68     Iloc_trunk = [I_trunkX 0 0; 0 I_trunkY 0; 0 0 I_trunkZ];
```



```

    %symmetric object
69     quat_trunk(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        orientation(1:4); %angles from Xsens
70     theta_trunk(a,:) = quat2eul(quat_trunk(a,:)); %[rad] OBS
        !!! ZYX

71
72     %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
        wolfram.com/RotationMatrix.html
73     R_trunkX = [1 0 0; 0 cos(theta_trunk(a,3)) sin(
        theta_trunk(a,3)); 0 -sin(theta_trunk(a,3)) cos(
        theta_trunk(a,3))];
74     R_trunkY = [cos(theta_trunk(a,2)) 0 -sin(theta_trunk(a
        ,2)); 0 1 0; sin(theta_trunk(a,2)) 0 cos(theta_trunk(
        a,2))];
75     R_trunkZ = [cos(theta_trunk(a,1)) sin(theta_trunk(a,1))
        0; -sin(theta_trunk(a,1)) cos(theta_trunk(a,1)) 0; 0
        0 1];

76
77     R_trunk = R_trunkZ * R_trunkY * R_trunkX; %http://
        planning.cs.uiuc.edu/node102.html

78
79     %global inertia
80     I_trunk = R_trunk * Iloc_trunk * R_trunk';
81     %energy trunk
82     E_trunk(a) = (1/2) * omega_trunkTO' * I_trunk *
        omega_trunkTO;

83
84
85 %% head
86     %angular velocity
87     omega_headTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        angularVelocity(19:21)';

88
89     %local inertia - origin i bottom of cylinder
90     I_head = (2/5) * mass_head * head_radius^2;

91
92
93     Iloc_head = [I_head 0 0; 0 I_head 0; 0 0 I_head]; %
        symmetric object
94     quat_head(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        orientation(25:28);
95     theta_head(a,:) = quat2eul(quat_head(a,:)); %[rad] OBS
        !!! ZYX

96
97     %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
        wolfram.com/RotationMatrix.html

```

```

108 R_headX = [1 0 0; 0 cos(theta_head(a,3)) sin(theta_head(
109 a,3)); 0 -sin(theta_head(a,3)) cos(theta_head(a,3))];
110 R_headY = [cos(theta_head(a,2)) 0 -sin(theta_head(a,2));
111 0 1 0; sin(theta_head(a,2)) 0 cos(theta_head(a,2))];
112 R_headZ = [cos(theta_head(a,1)) sin(theta_head(a,1)) 0;
113 -sin(theta_head(a,1)) cos(theta_head(a,1)) 0; 0 0 1];
114
115 R_head = R_headZ * R_headY * R_headX; %http://planning.
116 cs.uiuc.edu/node102.html
117
118 %global inertia
119 I_head = R_head * Iloc_head * R_head';
120 %energy trunk
121 E_head(a) = (1/2) * omega_headTO' * I_head *
122 omega_headTO;
123
124 %% left Thigh
125 %angular velocity
126 omega_lThighTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
127 angularVelocity(58:60)';
128 %local inertia - origin i bottom of cylinder
129 I_lThighX = mass_thigh * ((1/4) * thigh_radius^2 + 1/12
130 * thigh_length^2);
131 I_lThighY = I_lThighX;
132 I_lThighZ = 1/2 * mass_thigh * thigh_radius^2;
133
134 Iloc_lThigh = [I_lThighX 0 0; 0 I_lThighY 0; 0 0
135 I_lThighZ]; %symmetric object
136 quat_lThigh(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
137 orientation(77:80);
138 theta_lThigh(a,:) = quat2eul(quat_lThigh(a,:)); %[rad]
139 OBS!!! ZYX
140
141 %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
142 wolfram.com/RotationMatrix.html
143 R_lThighX = [1 0 0; 0 cos(theta_lThigh(a,3)) sin(
144 theta_lThigh(a,3)); 0 -sin(theta_lThigh(a,3)) cos(
145 theta_lThigh(a,3))];
146 R_lThighY = [cos(theta_lThigh(a,2)) 0 -sin(theta_lThigh(
147 a,2)); 0 1 0; sin(theta_lThigh(a,2)) 0 cos(
148 theta_lThigh(a,2))];
149 R_lThighZ = [cos(theta_lThigh(a,1)) sin(theta_lThigh(a
150 ,1)) 0; -sin(theta_lThigh(a,1)) cos(theta_lThigh(a,1)
151 ) 0; 0 0 1];
152
153

```

```

127     R_lThigh = R_lThighZ * R_lThighY * R_lThighX; %http://
        planning.cs.uiuc.edu/node102.html
128
129     %global inertia
130     I_lThigh = R_lThigh * Iloc_lThigh * R_lThigh';
131     %energy trunk
132     E_lThigh(a) = (1/2) * omega_lThighTO' * I_lThigh *
        omega_lThighTO;
133
134     %% right Thigh
135     %angular velocity
136     omega_rThighTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        angularVelocity(46:48)';
137     %local inertia - origin i bottom of cylinder
138     I_rThighX = mass_thigh * ( (1/4) * thigh_radius^2 + 1/12
        * thigh_length^2);
139     I_rThighY = I_rThighX;
140     I_rThighZ = 1/2 * mass_thigh * thigh_radius^2;
141
142
143     Iloc_rThigh = [I_rThighX 0 0; 0 I_rThighY 0; 0 0
        I_rThighZ]; %symmetric object
144     quat_rThigh(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        orientation(61:64);
145     theta_rThigh(a,:) = quat2eul(quat_rThigh(a,:)); %[rad]
        OBS!!! ZYX
146
147     %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
        wolfram.com/RotationMatrix.html
148     R_rThighX = [1 0 0; 0 cos(theta_rThigh(a,3)) sin(
        theta_rThigh(a,3)); 0 -sin(theta_rThigh(a,3)) cos(
        theta_rThigh(a,3))];
149     R_rThighY = [cos(theta_rThigh(a,2)) 0 -sin(theta_rThigh(
        a,2)); 0 1 0; sin(theta_rThigh(a,2)) 0 cos(
        theta_rThigh(a,2))];
150     R_rThighZ = [cos(theta_rThigh(a,1)) sin(theta_rThigh(a
        ,1)) 0; -sin(theta_rThigh(a,1)) cos(theta_rThigh(a,1)
        ) 0; 0 0 1];
151
152     R_rThigh = R_rThighZ * R_rThighY * R_rThighX; %http://
        planning.cs.uiuc.edu/node102.html
153
154     %global inertia
155     I_rThigh = R_rThigh * Iloc_rThigh * R_rThigh';
156     %energy trunk
157     E_rThigh(a) = (1/2) * omega_rThighTO' * I_rThigh *

```

```

    omega_rThighTO;
158
159     %% right Calf
160     %angular velocity
161     omega_rCalfTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        angularVelocity(49:51)';
162     %local inertia - origin i bottom of cylinder
163     I_rCalfX = mass_calf * ((1/4) * calf_radius^2 + 1/12 *
        calf_length^2);
164     I_rCalfY = I_rCalfX;
165     I_rCalfZ = 1/2 * mass_calf * calf_radius^2;
166
167
168     Iloc_rCalf = [I_rCalfX 0 0; 0 I_rCalfY 0; 0 0 I_rCalfZ];
        %symmetric object
169     quat_rCalf(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        orientation(65:68);
170     theta_rCalf(a,:) = quat2eul(quat_rCalf(a,:)); %[rad] OBS
        !!! ZYX
171
172     %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
        wolfram.com/RotationMatrix.html
173     R_rCalfX = [1 0 0; 0 cos(theta_rCalf(a,3)) sin(
        theta_rCalf(a,3)); 0 -sin(theta_rCalf(a,3)) cos(
        theta_rCalf(a,3))];
174     R_rCalfY = [cos(theta_rCalf(a,2)) 0 -sin(theta_rCalf(a
        ,2)); 0 1 0; sin(theta_rCalf(a,2)) 0 cos(theta_rCalf(
        a,2))];
175     R_rCalfZ = [cos(theta_rCalf(a,1)) sin(theta_rCalf(a,1))
        0; -sin(theta_rCalf(a,1)) cos(theta_rCalf(a,1)) 0; 0
        0 1];
176
177     R_rCalf = R_rCalfZ * R_rCalfY * R_rCalfX; %http://
        planning.cs.uiuc.edu/node102.html
178
179     %global inertia
180     I_rCalf = R_rCalf * Iloc_rCalf * R_rCalf';
181     %energy trunk
182     E_rCalf(a) = (1/2) * omega_rCalfTO' * I_rCalf *
        omega_rCalfTO;
183
184     %% left Calf
185     %angular velocity
186     omega_lCalfTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
        angularVelocity(61:63)';
187     %local inertia - origin i bottom of cylinder

```

```

188 I_lCalfX = mass_calf * ((1/4) * calf_radius^2 + 1/12 *
    calf_length^2);
189 I_lCalfY = I_lCalfX;
190 I_lCalfZ = 1/2 * mass_calf * calf_radius^2;
191
192
193 Iloc_lCalf = [I_lCalfX 0 0; 0 I_lCalfY 0; 0 0 I_lCalfZ];
    %symmetric object
194 quat_lCalf(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    orientation(81:84);
195 theta_lCalf(a,:) = quat2eul(quat_lCalf(a,:)); %[rad] OBS
    !!! ZYX
196
197 %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
    wolfram.com/RotationMatrix.html
198 R_lCalfX = [1 0 0; 0 cos(theta_lCalf(a,3)) sin(
    theta_lCalf(a,3)); 0 -sin(theta_lCalf(a,3)) cos(
    theta_lCalf(a,3))];
199 R_lCalfY = [cos(theta_lCalf(a,2)) 0 -sin(theta_lCalf(a
    ,2)); 0 1 0; sin(theta_lCalf(a,2)) 0 cos(theta_lCalf(
    a,2))];
200 R_lCalfZ = [cos(theta_lCalf(a,1)) sin(theta_lCalf(a,1))
    0; -sin(theta_lCalf(a,1)) cos(theta_lCalf(a,1)) 0; 0
    0 1];
201
202 R_lCalf = R_lCalfZ * R_lCalfY * R_lCalfX; %http://
    planning.cs.uiuc.edu/node102.html
203
204 %global inertia
205 I_lCalf = R_lCalf * Iloc_lCalf * R_lCalf';
206 %energy trunk
207 E_lCalf(a) = (1/2) * omega_lCalfTO' * I_lCalf *
    omega_lCalfTO;
208
209 %% left upperArm
    %angular velocity
210 omega_luarmTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    angularVelocity(37:39)';
211 %local inertia - origin i bottom of cylinder
212 I_luarmX = mass_uarm * ((1/4) * uarm_radius^2 + 1/12 *
    uarm_length^2);
213 I_luarmY = 1/2 * mass_uarm * uarm_radius^2;
214 I_luarmZ = I_luarmX;
215
216
217
218 Iloc_luarm = [I_luarmX 0 0; 0 I_luarmY 0; 0 0 I_luarmZ];

```

```

    %symmetric object
219 quat_luarm(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    orientation(49:52);
220 theta_luarm(a,:) = quat2eul(quat_luarm(a,:)); %[rad] OBS
    !!! ZYX

221
222 %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
    wolfram.com/RotationMatrix.html
223 R_luarmX = [1 0 0; 0 cos(theta_luarm(a,3)) sin(
    theta_luarm(a,3)); 0 -sin(theta_luarm(a,3)) cos(
    theta_luarm(a,3))];
224 R_luarmY = [cos(theta_luarm(a,2)) 0 -sin(theta_luarm(a
    ,2)); 0 1 0; sin(theta_luarm(a,2)) 0 cos(theta_luarm(
    a,2))];
225 R_luarmZ = [cos(theta_luarm(a,1)) sin(theta_luarm(a,1))
    0; -sin(theta_luarm(a,1)) cos(theta_luarm(a,1)) 0; 0
    0 1];

226
227 R_luarm = R_luarmZ * R_luarmY * R_luarmX; %http://
    planning.cs.uiuc.edu/node102.html

228
229 %global inertia
230 I_luarm = R_luarm * Iloc_luarm * R_luarm';
231 %energy trunk
232 E_luarm(a) = (1/2) * omega_luarmTO' * I_luarm *
    omega_luarmTO;

233
234 %% right upperArm
235 %angular velocity
236 omega_ruarmTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    angularVelocity(25:27)';
237 %local inertia - origin i bottom of cylinder
238 I_ruarmX = mass_uarm * ((1/4) * uarm_radius^2 + 1/12 *
    uarm_length^2);
239 I_ruarmY = 1/2 * mass_uarm * uarm_radius^2;
240 I_ruarmZ = I_ruarmX;

241
242
243 Iloc_ruarm = [I_ruarmX 0 0; 0 I_ruarmY 0; 0 0 I_ruarmZ];
    %symmetric object
244 quat_ruarm(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    orientation(33:36);
245 theta_ruarm(a,:) = quat2eul(quat_ruarm(a,:)); %[rad] OBS
    !!! ZYX

246
247 %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.

```

```

    wolfram.com/RotationMatrix.html
248 R_ruarmX = [1 0 0; 0 cos(theta_ruarm(a,3)) sin(
    theta_ruarm(a,3)); 0 -sin(theta_ruarm(a,3)) cos(
    theta_ruarm(a,3))];
249 R_ruarmY = [cos(theta_ruarm(a,2)) 0 -sin(theta_ruarm(a
    ,2)); 0 1 0; sin(theta_ruarm(a,2)) 0 cos(theta_ruarm(
    a,2))];
250 R_ruarmZ = [cos(theta_ruarm(a,1)) sin(theta_ruarm(a,1))
    0; -sin(theta_ruarm(a,1)) cos(theta_ruarm(a,1)) 0; 0
    0 1];
251
252 R_ruarm = R_ruarmZ * R_ruarmY * R_ruarmX; %http://
    planning.cs.uiuc.edu/node102.html
253
254 %global inertia
255 I_ruarm = R_ruarm * Iloc_ruarm * R_ruarm';
256 %energy trunk
257 E_ruarm(a) = (1/2) * omega_ruarmTO' * I_ruarm *
    omega_ruarmTO;
258
259 %% right lowerArm
260 %angular velocity
261 omega_rlarmTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    angularVelocity(28:30)';
262 %local inertia - origin i bottom of cylinder
263 I_rlarmX = mass_larm * ((1/4) * larm_radius^2 + 1/12 *
    larm_length^2);
264 I_rlarmY = 1/2 * mass_larm * larm_radius^2;
265 I_rlarmZ = I_rlarmX;
266
267
268 Iloc_rlarm = [I_rlarmX 0 0; 0 I_rlarmY 0; 0 0 I_rlarmZ];
    %symmetric object
269 quat_rlarm(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
    orientation(37:40);
270 theta_rlarm(a,:) = quat2eul(quat_rlarm(a,:)); %[rad] OBS
    !!! ZYX
271
272 %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
    wolfram.com/RotationMatrix.html
273 R_rlarmX = [1 0 0; 0 cos(theta_rlarm(a,3)) sin(
    theta_rlarm(a,3)); 0 -sin(theta_rlarm(a,3)) cos(
    theta_rlarm(a,3))];
274 R_rlarmY = [cos(theta_rlarm(a,2)) 0 -sin(theta_rlarm(a
    ,2)); 0 1 0; sin(theta_rlarm(a,2)) 0 cos(theta_rlarm(
    a,2))];

```

```

275 R_rlarmZ = [cos(theta_rlarm(a,1)) sin(theta_rlarm(a,1))
              0; -sin(theta_rlarm(a,1)) cos(theta_rlarm(a,1)) 0; 0
              0 1];
276
277 R_rlarm = R_rlarmZ * R_rlarmY * R_rlarmX; %http://
      planning.cs.uiuc.edu/node102.html
278
279 %global inertia
280 I_rlarm = R_rlarm * Iloc_rlarm * R_rlarm';
281 %energy trunk
282 E_rlarm(a) = (1/2) * omega_rlarmTO' * I_rlarm *
      omega_rlarmTO ;
283
284 %% left lowerArm
285 %angular velocity
286 omega_llarmTO = tree.subject.frames.frame(index(a)).
      angularVelocity(40:42)';
287 %local inertia - origin i bottom of cylinder
288 I_llarmX = mass_larm * ((1/4) * larm_radius^2 + 1/12 *
      larm_length^2);
289 I_llarmY = 1/2 * mass_larm * larm_radius^2;
290 I_llarmZ = I_llarmX;
291
292
293 Iloc_llarm = [I_llarmX 0 0; 0 I_llarmY 0; 0 0 I_llarmZ];
      %symmetric object
294 quat_llarm(a,:) = tree.subject.frames.frame(index(a)).
      orientation(53:56);
295 theta_llarm(a,:) = quat2eul(quat_llarm(a,:)); %[rad] OBS
      !!! ZYX
296
297 %rotation matrix - counter-clockwise http://mathworld.
      wolfram.com/RotationMatrix.html
298 R_llarmX = [1 0 0; 0 cos(theta_llarm(a,3)) sin(
      theta_llarm(a,3)); 0 -sin(theta_llarm(a,3)) cos(
      theta_llarm(a,3))];
299 R_llarmY = [cos(theta_llarm(a,2)) 0 -sin(theta_llarm(a
      ,2)); 0 1 0; sin(theta_llarm(a,2)) 0 cos(theta_llarm(
      a,2))];
300 R_llarmZ = [cos(theta_llarm(a,1)) sin(theta_llarm(a,1))
      0; -sin(theta_llarm(a,1)) cos(theta_llarm(a,1)) 0; 0
      0 1];
301
302 R_llarm = R_llarmZ * R_llarmY * R_llarmX; %http://
      planning.cs.uiuc.edu/node102.html
303

```



```
304     %global inertia
305     I_llarm = R_llarm * Iloc_llarm * R_llarm';
306     %energy trunk
307     E_llarm(a) = (1/2) * omega_llarmTO' * I_llarm *
        omega_llarmTO;
308 end
309
310 %total energy
311 E_tot = E_head + E_lCalf + E_llarm + E_lThigh + E_luarm +
        E_rCalf + E_rlarm + E_rThigh + E_ruarm + E_trunk;
312
313 .
```