

Akademia Wychowania Fizycznego  
im. Jerzego Kukuczki w Katowicach

Wioletta Biesiada

**MODELOWANIE WARUNKÓW WIELOKROTNYCH OBROTÓW  
W SALCIE „WILDCAT” W SNOWBOARDZIE**

Rozprawa na stopień doktora nauk o kulturze fizycznej

Promotor:

dr hab. Bogdan Bacik,  
prof. AWF Katowice

Promotor pomocniczy:

dr inż. Piotr Wodarski,  
Politechnika Śląska

Katowice 2022

*„Nie ma dobrych modeli,  
ale niektóre są użyteczne.”*

*[BOA]*

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### SPIS TREŚCI

WSTĘP .....	5
ROZDZIAŁ I .....	6
WPROWADZENIE TEORETYCZNE DO PROBLEMATYKI PRACY .....	6
1.1. SNOWBOARD .....	6
1.1.1. SNOWBOARD JAKO DYSCYPLINA .....	6
1.1.2. SKOKI SNOWBOARDOWE .....	10
1.2. ROLA BIOMECHANIKI W SPORCIE .....	13
1.3. FAZOWA STRUKTURA RUCHU .....	17
1.4. MODELOWANIE .....	19
1.4.1. MODELE O PARAMETRACH SKUPIONYCH .....	20
1.4.2. DETERMINISTYCZNY MODEL RUCHU .....	21
ROZDZIAŁ II .....	25
PROBLEMATYKA BADAWCZA .....	25
ROZDZIAŁ III .....	26
MATERIAŁ I METODY BADAWCZE .....	26
3.1. MATERIAŁ BADAWCZY .....	26
3.2. MIEJSCE BADAŃ .....	27
3.3. NARZĘDZIA BADAWCZE .....	30
3.4. PROTOKÓŁ POMIAROWY .....	32
3.5. UZYSKANIE DANYCH POMIAROWYCH .....	34
3.6. OPRACOWANIE DANYCH POMIAROWYCH .....	38
ROZDZIAŁ IV .....	41
WYNIKI WRAZ Z OMÓWIENIEM .....	41
4.1. ETAP I – OPISANIE STRUKTURY KINEMATYCZNEJ FAZY LOTU W POJEDYNCZYM SALCIE „WILDCAT” .....	41
4.1.1. FAZOWA STRUKTURA LOTU TRIKU „WILDCAT” .....	41

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

4.1.2.	STRATEGIE WYKONANIA FAZY LOTU W SALCIE „WILDCAT” ...	47
4.1.3.	PORÓWNANIE STRATEGII „U” I „V” W SALCIE „WILDCAT” .....	50
4.2.	ETAP II – IDENTYFIKACJA ZMIENNOŚCI RUCHÓW W FAZIE LOTU W POJEDYNCZYM SALCIE „WILDCAT” .....	61
4.3.	ETAP III – OPRACOWANIE MODELU FAZY LOTU POJEDYNCZEGO SALTA „WILDCAT” PRZY UŻYCIU MODELU PUNKTOWEGO I MODELU ELIPSOIDY BEZWŁADNOŚCI CIAŁA Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNOŚCI RUCHÓW I WARUNKÓW POCZĄTKOWYCH .....	66
4.3.1	MODEL DETERMINISTYCZNY SALTA SNOWBOARDOWEGO .....	66
4.3.2	PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA MODELU .....	67
4.3.3	MODELOWANIE W STWORZONEJ APLIKACJI .....	68
4.4.	ETAP IV – OKREŚLENIE WARUNKÓW WYKONANIA FAZY LOTU W PODWÓJNYM SALCIE „WILDCAT” NA PODSTAWIE MODELU .....	74
4.5.	ETAP V – WALIDACJA MODELU POPRZEZ PORÓWNANIE UZYSKANYCH W FAZIE LOTU WYNIKÓW PODWÓJNEGO SALTA „WILDCAT” Z WYNIKAMI RZECZYWISTYMI (EMPIRYCZNYMI).....	83
4.5.1	CZĘŚĆ PIERWSZA WALIDACJI MODELU.....	84
4.5.2	CZĘŚĆ DRUGA WALIDACJI MODELU.....	85
4.5.3	CZĘŚĆ TRZECIA WALIDACJI MODELU .....	87
	PODSUMOWANIE Z ELEMENTAMI DYSKUSJI.....	91
	STRESZCZENIE.....	97
	SUMMARY.....	101
	BIBLIOGRAFIA .....	104
	NETOGRAFIA .....	113
	SPIS RYSUNKÓW .....	114
	SPIS TABEL.....	118
	ANEKS .....	120



## **WSTĘP**

Proces treningu sportowego stale ewoluuje. Jego celem jest nieustanny rozwój zawodników oraz konkurencji sportowych zakładający w efekcie osiągnięcie mistrzostwa sportowego na coraz wyższym poziomie. Wspomniany cel może zostać osiągnięty poprzez nieustanne dążenie do perfekcji, a więc jak najlepsze opanowanie aktualnej specjalistycznej techniki sportowej danej konkurencji wsparte wysokim poziomem niezbędnych zdolności motorycznych. Nieprzypadkowo zostaje tutaj użyte słowo „obecna” technika sportowa, gdyż wraz z rozwojem dyscyplin sportowych zmienia się także najbardziej efektywny sposób wykonania zadania ruchowego. Wykorzystywane nowatorskie technologie wraz ze „świeżym” podejściem pozwalają na modyfikację istniejących i wdrażanie nowych działań dotyczących szeroko rozumianej kultury fizycznej w sporcie, w tym tych dotyczących budowy treningu. Potwierdza to Haake (2009), który w celu zidentyfikowania wpływu technologii na osiąganе wyniki sportowe przeanalizował statystyki pod względem rezultatów najlepszych zawodników w czterech konkurencjach sportowych (tj. w biegu na dystansie 100m, skoku o tyczce, rzucie oszczepem, kolarstwie) na przełomie kilkudziesięciu lat. Autor poprzez opracowany wskaźnik poprawy wydajności przedstawił korzystne zmiany w rozwoju dyscyplin pod względem stosowania różnych dodatkowych czynników, w tym technologicznych. Wyjątek stanowił rzut oszczepem, gdzie przesunięcie środka masy obniżyło uzyskiwane w rzutach odległości, jednakże takie było założenie wprowadzonego zabiegu.

Istnieje wiele opracowań opisujących technikę ruchu różnych konkurencji sportowych. Typowo biomechaniczne podejście w tym temacie zostało przedstawione przez James’a Hey’a, który w swojej książce „The Biomechanics of Sports Techniques” analizuje realizowaną technikę ruchu w baseballu, koszykówce, piłce nożnej, golfie, gimnastyce, softballu, pływaniu oraz w biegach, skokach i rzutach lekkoatletycznych (Hay 1993). Ponadto autor wskazuje naukowe podstawy tych zagadnień, tj. czynniki mechaniczne warunkujące wydajność prezentowanej techniki. Takie pozycje wydają się niezbędne dla zrozumienia różnorodnych zadań ruchowych jak i dla oceny wpływu różnych czynników na efekt końcowy. Jednakże po przeprowadzeniu kwerendy literaturowej nie znaleziono publikacji, w której opisano by strukturę ruchu technik snowboardowych i zależności funkcyjne między zmiennymi, które ją determinują.

## ROZDZIAŁ I

### WPROWADZENIE TEORETYCZNE DO PROBLEMATYKI PRACY

#### 1.1. SNOWBOARD

##### *1.1.1. SNOWBOARD JAKO DYSCYPLINA*

Przykładem dynamicznie rozwijającej się dyscypliny sportu, w której brakuje badań techniki ruchu jest snowboard. Posiada stosunkowo krótką historię, gdyż początki zjazdów na desce po śniegu sięgają lat 60' ubiegłego wieku. Rozwijał się głównie jako młodzieżowa opozycja wobec „tradycyjnego” a popularnego narciarstwa (Heino 2000). Od pierwszego zorganizowanego snowboardowego konkursu do wprowadzenia go do programu zimowych igrzysk olimpijskich minęło zaledwie 17 lat, co niewątpliwie świadczy o jego randze. Obecnie szacuje się, że w Szwajcarii jest aż 600 000 snowboardzistów (Hasler et al. 2010), a w USA 3,4 miliona. Dodatkowo Raport National Sporting Goods Association USA donosi, że od 1988 roku liczba osób jeżdżących na snowboardzie wzrosła o 70%, gdy w tym samym czasie liczba narciarzy zmalała o 25% (Zygmuntowicz, Czerwiński 2007).

Nieodzowną częścią tak rozwijającej się dyscypliny zarówno w aspekcie sportowym jak i rekreacyjnym stał się coraz wyższy poziom zaawansowania. W przypadku snowboardu to już nie tylko jazda „na desce” ale również wprowadzenie powietrznych ewolucji, czyli „skoków”. Opracowania dotyczące nauczania „tricków” na stoku są ze sobą zgodne, że proces skoków powinien nastąpić dopiero po dobrym opanowaniu podstawowej techniki jazdy na desce.

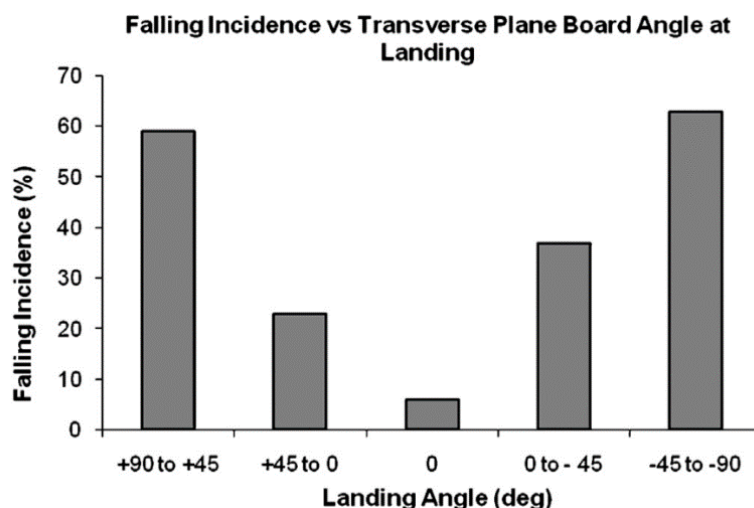
Jak zatem osiągać kolejne etapy rozwoju? W tym zakresie wspomniane pozycje podręcznikowe niestety niewiele mówią. Aczkolwiek zdecydowanie nie można zgodzić się ze znalezionym w jednym z nich stwierdzeniem, iż „po opanowaniu podstaw można zacząć próbować ‘bawić się deską’, na tym polega bowiem wykonywanie tricków na trasie. Można robić wszystko, co przyjdzie do głowy, czego świadomie lub przez przypadek można się nauczyć! Im tricki będą bardziej zróżnicowane, wykonywane bardziej swobodnie i w różnym terenie, tym lepiej” (Marciniak 2007). Temu „pomysłowi” nie towarzyszy żadne wytłumaczenie w jaki sposób bezpiecznie i prawidłowo wykonać skok. Co więcej zacytowane zdanie niejako zachęca do stosowania spontanicznych, przypadkowych prób. Takie zachowania mogą przynosić nieprzewidywalne efekty. Gdzie zatem miejsce na aspekt bezpieczeństwa o którym wspomina wcześniej sam autor cytatu? Z jednej strony powinno się uczyć skoków po opanowaniu techniki jazdy, a z drugiej „uczy się” ich całkowicie przypadkowo na zasadzie,

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

że „coś z tego wyjdzie”. Tym bardziej, że według statystyk aż 40-60% początkujących snowboardzistów odnosi urazy, podczas gdy u początkujących narciarzy to 18-34%, natomiast doniesienia o liczebności kontuzji snowboardzistów mówią o od 4 do 16 na 1000 dni jazdy na „desce” (Bladin, McCrory, Pogorzelski 2004), przy czym najwyższa liczba dotyczy konkurencji „Big Air” (Zygmuntowicz, Czerwiński 2007). Za najistotniejsze czynniki sprzyjające powstawaniu urazów wskazuje się: nieopanowanie i nieprzygotowanie do prędkości ruchu, „stary” śnieg, brak lub ograniczenie widoczności (Hasler et al. 2010). Natomiast najczęstszymi przyczynami urazów są „błędy ludzkie” (Bladin, McCrory, Pogorzelski 2004) a wśród nich po prostu „błędy techniczne” (Zygmuntowicz, Czerwiński 2007).

Triki snowboardowe, w których występuje faza lotu znacznie zwiększają ryzyko wystąpienia urazów (konkurencje „Halfpipe”, „Slop Style”, „Big Air”). Najczęściej do obrażeń dochodzi podczas lądowania, a najbardziej są na nie narażone kończyny dolne (Pino 1989; Made 2004; McAlpine et al. 2012). W literaturze analizowane są również wartości występujących obciążeń w obrębie stawów kończyn dolnych porównując jazdę na nartach i snowboardzie w zależności od kierunku jazdy (Klous, Müller, Schwameder 2014). Te wszystkie informacje na temat typów urazów i mechanizmów ich powstania w efekcie inspirują do modyfikacji stosowanego sprzętu oraz do tworzenia nowych rozwiązań (Carpenter 1993; Ellison 2010). Powstałe środki mają na celu zwiększenie bezpieczeństwa i komfortu jazdy w specyficznych śniegowych warunkach. Wszystkie wspomniane badania dotyczą jedynie fazy lądowania. Polegają na pomiarach zmiennych kinematycznych i kinetycznych w trakcie lądowania (Delorme, Tavoularis, Lamontagne 2005; McAlpine, Kersting 2006; McAlpine et al. 2012). Autorzy jednego z nowszych opracowań wskazują precyzyjnie, że jeśli w chwili lądowania kąt pomiędzy osią długą deski a kierunkiem jazdy mieści się w zakresie 45-90° to w ponad 60% kończy się to upadkiem (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2017) (rys. 1). Ponieważ faza lądowania zdeterminowana jest przez zachowanie zawodnika w locie wydaje się zasadna ilościowa analiza tej fazy. Jedyne znalezione publikacje dotyczyły symulowanych ruchów na trenażerze (Park et al. 2015), ruchów w warunkach standardowych (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2017) oraz „on-snow” (McAlpine, Kersting 2006).

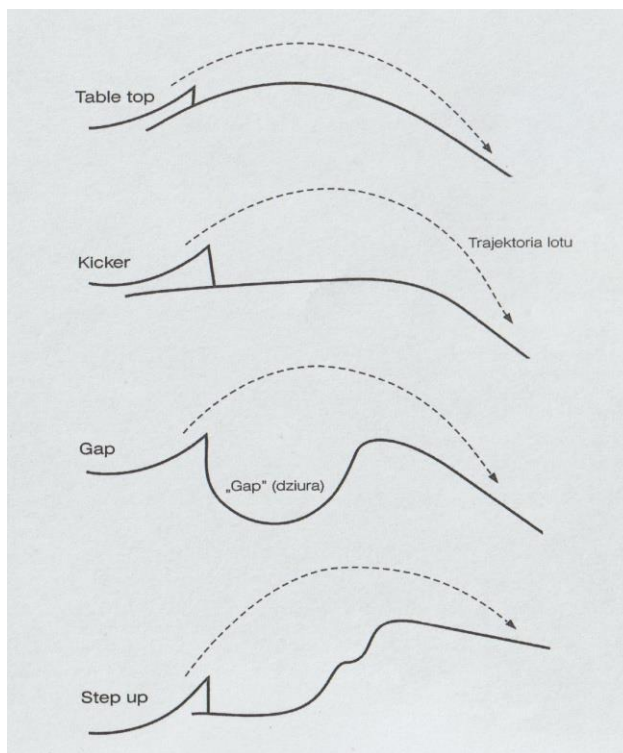
## - ROZPRAWA DOKTORSKA -



Rysunek 1. Częstość upadków podczas lądowania w zależności od ustawienia osi deski w stosunku do kierunku jazdy (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2017).

Należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, iż bezpieczeństwo zawodnika zależne jest od poprawnej techniki wykonania każdej fazy ruchu. Mimo że uraz nastąpi w wyniku lądowania, to nawet najmniejszy błąd popełniony podczas innej fazy, np. w locie, zwiększa prawdopodobieństwo niepowodzenia podczas samego lądowania. Dlatego aktualne badania powinny skupiać się na poprawie wspomnianej już techniki wykonania całości zadania ruchowego (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2017). Do tego celu może posłużyć biomechanika. Spiros Prassas podczas poświęconemu gimnastyce XVII Międzynarodowego Sympozjum Biomechaniki w Sporcie w referacie “Biomechanical Research In Gymnastics: What Is Done, What Is Needed” (Prassas, Sanders 1999) zdefiniował jej role dla 1) zrozumienia istniejących technik ruchu; 2) rozwoju nowych umiejętności; 3) zwiększenia bezpieczeństwa; 4) projektowania i/lub modyfikacji sprzętu sportowego. Idealnie wpisuje się to w problematykę nauczania snowboardu. Zamieszczane opisy wykonania ewolucji w powietrzu nie są precyzyjne. Sformułowania typu: „wykonujemy rotację ciała w kierunku obrotu”, „odbijamy się dynamicznie”, „kolana trzymamy lekko ugięte”, „lekko podciągamy obie nogi pod tułów i pochylamy tułów do przodu”, „obracamy deskę za ciałem” (Marciniak 2007), stanowią jedynie wskazówki a nie konkretny sposób realizacji zadania ruchowego. Jak podkreśla sama nazwa konkurencji, FREESTYLE ma „w sobie” wiele dowolności. Jednak taka „dowolność” nie może dotyczyć niejednokrotnie już podkreślanego aspektu bezpieczeństwa zawodników, począwszy od etapu nauczania. Szczególnie kiedy postępowanie w celu realizacji skoku zależy również od rodzaju skoczni, na której zostaje on wykonywany (Marciniak 2007) (rys. 2).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -



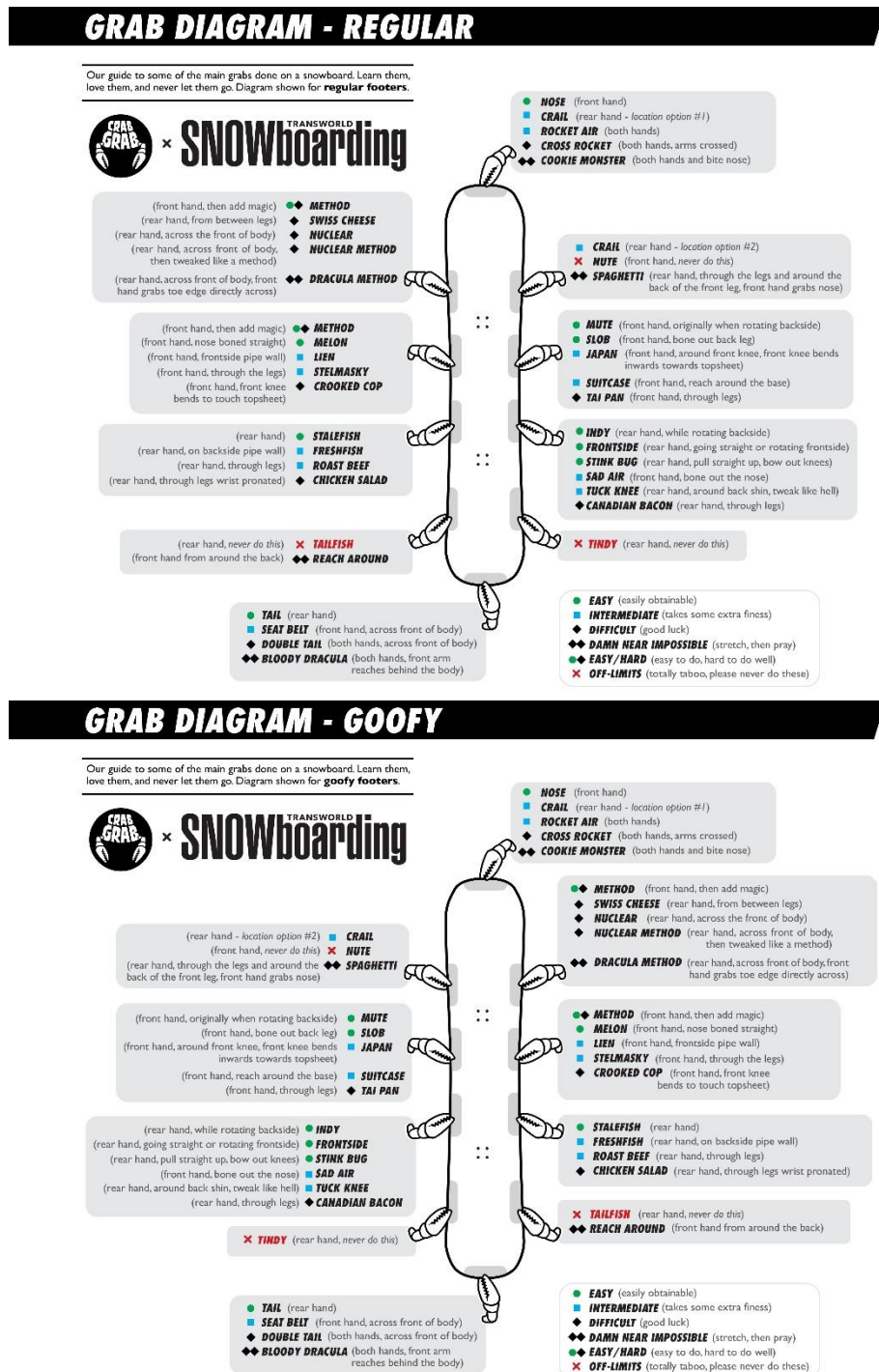
Rysunek 2. Rodzaje skoczni snowboardowych (Marciniak 2007).

Dlatego nieodzownym elementem poprzedzającym proces nauczania i doskonalenia techniki sportowej jest poznanie i zrozumienie wskazanego ruchu – tak jak ma to miejsce w wielu innych popularnych dyscyplinach. Dla przykładu w gimnastyce sportowej zauważono, że zdecydowanie częściej powinno skupiać się na wiedzy dotyczącej poprawnej techniki wykonywania ćwiczeń. Dzięki temu powstał przegląd literatury opisujący istotne zmienne wpływające na wydajność ruchu (Prassas, Kwon, Sands 2006). Mimo iż snowboard bazuje na teoretycznie znanych już ewolucjach (głównie wywodzących się właśnie ze sportów gimnastycznych), to ich specyficzne wykonanie w odmiennych warunkach odbiega od pierwowzoru. Warunki realizacji, np. zmieniające się naśnieżenie, kształt rampy (skoczni), zróżnicowane podłoże, specjalny strój sportowy oraz obecność deski zamykającej łańcuch biokinematyczny zawodnika powodują, że nie występuje prosty transfer motoryczny.

# - ROZPRAWA DOKTORSKA -

## 1.1.2. SKOKI SNOWBOARDOWE

Nazewnictwo poszczególnych skoków bazuje na stopniu trudności, stanowiąc niejako ich usystematyzowanie. Głównie dzieli się je na te wykonywane bez obrotów („ollie”) i z obrotami („big air”) oraz wykonywane z chwytem deski („grab”) (rys. 3) i bez chwytu.



Rysunek 3. Rodzaje chwytów deski w snowboardzie dla dwóch typów snowboardzistów, wskazanych w dalszej części pracy (<https://www.snowboarder.com/grab-directory/>).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Każdy skok został umownie podzielony na fazy: najazdu z odbiciem, lotu i lądowania. Skok prosty „ollie”, czyli podstawowy skok wykonywany w trakcie jazdy na stoku, polega na oderwaniu deski od śniegu (tzw. „podciągnięcie deski”). Natomiast triki z obrotami pogrupowano ze względu na przebieg fazy lotu, tj. na wykonywanie konkretnych rotacji wokół osi ciała: pionowej – obroty płaskie („frontside” i „backside”), poprzecznej – salta („backflip” i „backloop”), w dwóch płaszczyznach (np. „inverted airs”, „corkscrew”, „frontside rodeo”, „backside rodeo”, „butter shifty”) (FIS 2016). Pełna nazwa skoku składa się z kilku elementów. Najpierw zamieszczona jest informacja o sposobie najazdu na próg skoczni – natural (najazd na nogę wiodącą) lub switch (jazda tyłem). Następnie zostaje podany kierunek rotacji – frontside lub backside oraz ilość wykonywanych obrotów w stopniach (wartość rotacji). Natomiast na końcu znajduje się nazwa chwytu deski („grab”). W praktyce w nazwie skoku wpisywane jest jedynie określenie najazdu na switch (pomija się najazd natural). Rotacja frontside oznacza po odbiciu odwrócenie się przodem do kierunku lotu, zaś backside odwrócenie tyłem (plecami). Na przykład Switch frontside 360 mute oznacza skok z jednym pełnym obrotem wokół osi pionowej (360) w czasie którego podczas odbicia i lądowania tylna noga jest z przodu deski, a w fazie lotu przednia ręka chwytą deskę za frontside’ową krawędź pomiędzy wiązaniami.

W przeciwieństwie do narciarstwa, w snowboardzie nie stoi się frontalnie do kierunku jazdy. Dlatego zawodnicy definiują, która kończyna dolna jest ich tzw. „wiodącą” a która „tylną”. W podręczniku dla sędziów znajduje się określenie pozycji stóp jako: „Regular” (R) w przypadku ustawienia lewej stopy z przodu oraz „Goofy” (G) w przypadku prawej stopy z przodu (FIS 2019).

Jednym z pierwszych skoków nauczanych po opanowaniu obrotów płaskich jest trik „wildcat”. Jest to salto typu „sideflip” (tj. salto bokiem) z uwagi na wykonanie rotacji wokół osi bocznej (ang. Lateral axis), przebiegającej od przodu do tyłu zgodnie z nazewnictwem stosowanym w snowboardzie (FIS 2019). Anatomicznie jest to oś strzałkowa, a obrót wykonywany jest względem płaszczyzny czołowej. Jednak należy pamiętać o tym, iż zawodnik porusza się jadąc „bokiem” do kierunku jazdy. Geometria salta „wildcat” jest widoczna na rysunku 4, natomiast dla lepszego zobrazowania ruchu zamieszczono również kod QR stanowiący odnośnik do materiału filmowego przedstawiającego ten trik (rys. 5).





*Rysunek 4. Geometria salta „wildcat”  
(<http://www.wicklowmontessoriprimaryschoolcoders.me/coders2/charlie/index.html>).*



*Rysunek 5. Odnośnik w postaci kodu QR do materiału filmowego przedstawiającego wykonanie skoku „wildcat” na stoku (<https://www.youtube.com/watch?v=hQkRqymwudI>).*



## 1.2. ROLA BIOMECHANIKI W SPORCIE

W sporcie niezwykle pomocna okazuje się biomechanika, której analizie są wpisane w rozwój konkurencji. Począwszy od określenia występujących dla zawodników obciążeń po optymalne rozwiązania sprzętowe i techniczne pomagające w realizowaniu coraz trudniejszych zadań ruchowych. Jak pisze Knudson (2007) zastosowanie biomechaniki jest dwutorowe, tzn. z jednej strony poprawia wydajność ruchu, zaś z drugiej zapobiega obrażeniom ciała. Ponadto Knudson podkreśla, że ta dziedzina nauki jest szczególnie użyteczna w sportach, w których czynnikiem dominującym jest technika, a nie typowa sprawność fizyczna czy predyspozycje fizjologiczne. Ekspozuje także fakt, iż trenerzy powinni opierać swoje decyzje na znajomości mechaniki, aby pomóc w jakościowej analizie różnych sytuacji (Knudson 2007).

Przykładem takiego wykorzystania biomechaniki mogą być sporty gimnastyczne. Ponieważ gimnastyków cechuje kombinacja wszystkich zdolności motorycznych, bez głównej przodującej, znaczący wpływ na wynik ma technika sportowa. Zestawienie biomechanicznych badań w gimnastyce sportowej w postaci przeglądu literatury stworzyli Prassas, Kwon, Sands (2006) skupiając się na tym, co zostało zrobione, a czego nadal brakuje. Wskazują, iż mimo wzrostu ilości eksperymentów stosuje się jedynie próby uogólnienia. Potrzeba więc działań nakierowanych na zrozumienie zasad i podstaw sportu. Zagadnienia pogrupowali według identyfikacji istotnych parametrów mechanicznych zwiększających wydajność ruchu w zakresie: uzyskania wysokości ciała, nadania momentu pędu, metod dotyczących wykonywania obrotów wokół osi długiej ciała oraz wyhamowania ruchu. Określili stosowane typy ruchów wahadłowych na drążku oraz poręczach w zależności od sytuacji, strategie bezpiecznego lądowania, segmenty ciała wpływające na zdolność utrzymania równowagi, sposób uzyskiwania momentu pędu w skokach akrobatycznych, znaczenie rozbiegu i kontaktu z przyrządem w skoku przez stół gimnastyczny. Dodatkowo poddali analizie grupy ćwiczeń na poszczególnych przyrządach, tj. m.in. poręczach symetrycznych i asymetrycznych, drążku, kółkach, stole gimnastycznym. Podsumowanie artykułu stanowią wskazówki autorów co do ukierunkowania przyszłych badań w zakresie podejścia metodologicznego, gromadzenia danych i ich obróbki statystycznej (Prassas, Kwon, Sands 2006).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Szczegółowa analiza techniki sportowej znajduje się w pracach Mkaouer'a i współautorów. Oceniali wykonanie salta w tył – z miejsca w pozycji kucznej poprzedzonego odmiennym rodzajem zamachu ramion (Mkaouer et al. 2014) oraz po poprzedzeniu go różnymi elementami akrobatycznymi (flic-flackiem / 'flic' lub saltem tempowym / 'tempo salto') (Mkaouer et al. 2013). W obu przypadkach skupiono się na parametrach wpływających na wykonanie konkretnej czynności. Różny rodzaj zamachu salta z miejsca wynikał z istniejących trzech „optymalnych” metod nauczania – rosyjskiej zakładającej zakreślenie przez ramiona w stosunku do tułowia kąta  $270^\circ$ , chińskiej stosującej kąt  $180^\circ$  oraz rumuńskiej korzystającej z kąta  $90^\circ$ . Ostatecznie ową „wydajność” salta trzeba było dokładnie sprecyzować, ponieważ w zależności od przyjętej zmiennej wyniki wskazywały inną technikę jako tę najlepszą. Dlatego podsumowano, iż np. biorąc pod uwagę ryzyko wystąpienia upadku istotne będzie jak najwyższe przemieszczenie ogólnego środka ciężkości ciała zawodnika (OSC). Taki warunek spełniał zamach ramion wynoszący  $270^\circ$ . Natomiast w efekcie badań z zastosowaniem różnego rodzaju elementu poprzedzającego salto ('flic' lub 'tempo salto') stwierdzono, iż wspomniane wykonania ostatniego elementu różnią się pod względem kąta odbicia, nadanego pędu, uzyskanej pionowej prędkości oraz przemieszczeń poziomych i pionowych. Połączenie „rundak – 'flic' – salto” spowoduje uzyskanie wyższej wysokości salta, zaś sekwencja „rundak – 'tempo salto' – salto” wywoła salta wykonane niżej z przesunięciem w tył.

Rola biomechaniki polegająca na zrozumieniu ruchu, ze zwróceniem szczególnej uwagi na jego specyficzność została wykorzystana również przez federacje sportowe, np. przez Międzynarodową Federację Gimnastyczną (FIG – fr. Fédération Internationale de Gymnastique). Dotychczas w konkurencji Trampolina sędzia wykonania (Judges for Execution) oceniał u zawodnika pozycję kończyn górnych podczas wykonywania skoku, stosując potrącenia punktowe za „odbieganie” od wzorcowego wykonania – maksymalnie po 0,1 pkt za zgięcie stawów łokciowych oraz za ustawienie, w którym kończyny górne w stosunku do tułowia znajdowały się w położeniu powyżej kąta  $45^\circ$  (FIG 2010) (rys. 6). Zapis ten zmodyfikowano dopiero w kolejnych przepisach (FIG 2013). Zwrócono uwagę na fakt, iż w przypadku wykonywania wielokrotnych obrotów „wyhamowanie” rotacji poprzez ustawienie ramion do kąta  $45^\circ$  nie jest fizycznie możliwe. Dlatego aktualne reguły uwzględniają zasadę, że ruch kończyn górnych wykonywany do hamowania rotacji nie jest błędem. Zatem maksymalny kąt pomiędzy położeniem tułowia a kończynami górnymi powinien wynosić maksymalnie  $45^\circ$  w przypadku skoków: 'barani', 1 obrót ('śruba'),

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

salta wielokrotne z ½ obrotu ('wielokrotne salta z ½ śruby') oraz 90° dla skoków z większą ilością obrotów oraz pozostałych salt wielokrotnych (rys. 7).



FIG Code of Points 2010 - Trampoline Gymnastics - Part II - Guide to Judging



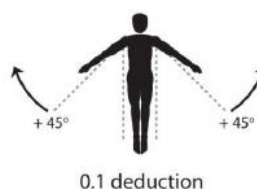
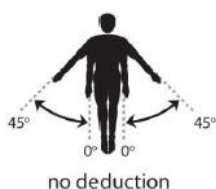
### 2. DRAWINGS (these drawings are for guidance only and should not be taken literally)

DEDUCTIONS	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
<b>ARMS</b>						
Bending of the arms						
Position of the arms						

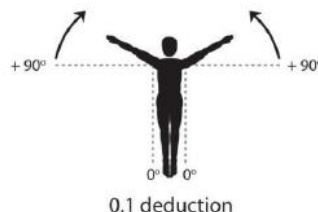
Rysunek 6. Wskazówki dotyczące stosowania potrąceń punktowych za ustawienie kończyn górnych obowiązujące do roku 2013 (FIG 2010).

### ARMS TO STOP TWISTING ROTATION

#### BARANI, FULL, MULTIPLE SOMERSAULTS WITH ½ OUT



#### SINGLE SOMERSAULT WITH MORE THAN FULL TWIST AND ALL OTHER MULTIPLE TWISTING SOMERSAULTS



Rysunek 7. Dopuszczalne położenie kończyn górnych względem tułowia służące do wyhamowania obrotów w zakończonym elemencie. Obowiązuje od 2013 roku (FIG 2013).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Ponadto w „Przewodniku do sędziowania” zrezygnowano z zamieszczania załączników przedstawiających skrajne położenia poszczególnych segmentów ciała adekwatnie do wielkości potrącenia noty, gdyż sędzia w bardzo krótkim czasie realizowanego elementu nie jest w stanie dostrzec wszystkich szczegółów (FIG 2013). Istnieją bowiem błędy wpływające na siebie wzajemnie, jak na przykład błędy w ustawieniu głowy (rys. 8). Biorąc pod uwagę zachowanie poszczególnych segmentów ciała jako połączonych ze sobą członów łańcucha biokinematycznego, to w trakcie wykonywania salta „zadarcie” głowy wpłynie na pozycję tułowia (najczęściej „wygięcie”). Zatem wystarczy poddać ocenie prawidłowość pozycji w elemencie, nie skupiając się dodatkowo na ustawieniu głowy.



FIG Code of Points 2010 - Trampoline Gymnastics - Part II - Guide to Judging



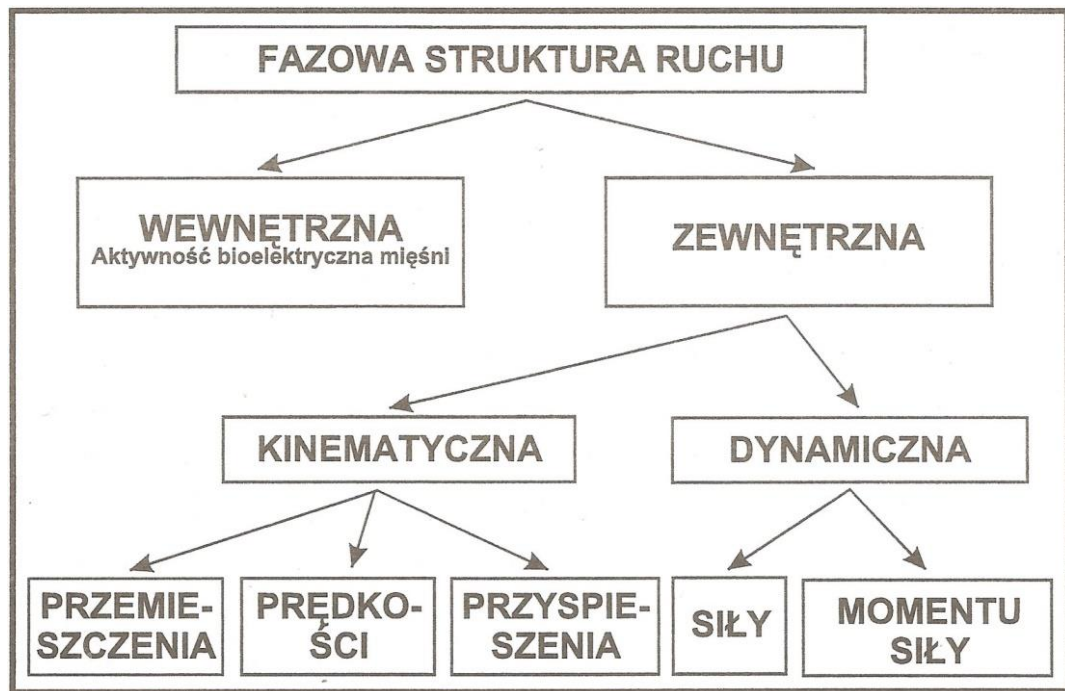
### 2. DRAWINGS (these drawings are for **guidance** only and should not be taken literally)

DEDUCTIONS	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
<b>HEAD</b>						
Position of the head						

Rysunek 8. Wskazówki dotyczące stosowania potrąceń punktowych za ustawienie głowy obowiązujące do roku 2013 (FIG 2010).

### 1.3. FAZOWA STRUKTURA RUCHU

Wszelkie modyfikacje zadań ruchowych powinny zostać wprowadzane dopiero po całkowitym zrozumieniu wykonywanej czynności, gdyż to świadomość stanowi bazę do wdrażania różnorodnych działań. W procesie treningowym najczęściej wykorzystywanym opisem ruchu jest identyfikacja struktury przestrzennej bądź dokładniej geometrii (Król 2003). Takie podejście pozwala na uwzględnienie ruchów jednocześnie w globalnym i lokalnym układzie odniesienia. To znaczy określa lokalizację ćwiczącego / zawodnika w przestrzeni oraz wyznacza położenie poszczególnych ogniw łańcucha biokinematycznego (części ciała) względem siebie. Jeśli dodatkowo zostanie uwzględniony czas przemieszczenia to uzyska się strukturę przestrzenno–czasową. Ocena owej struktury (jej poprawność) wiąże się ze skupieniem uwagi na poszczególnych cechujących ją elementach, fragmentach, fazach, sekwencjach ruchu. Dzięki temu istnieje możliwość odróżnienia jednego działania ruchowego od drugiego. Natomiast skuteczność wykonania ruchu determinują jego wybrane istotne właściwości. Zatem struktura ruchu stanowi „organizację (uporządkowanie) ważnych elementów – jego faz lub części – w ramach całości czynności ruchowej” (Król, Mynarski 2005). Podstawą zrozumienia struktury ruchu jest umiejętność określenia znaczenia oddzielnych jego części dla całości. Już najstarsze opracowania wskazują, iż w celu poznania złożonego ogółu analiza powinna łączyć się z syntezą a istotę tego zjawiska stanowi wzajemne współdziałanie wewnętrznych i zewnętrznych sił (Doński 1963). Król i Mynarski (2005) wyodrębnili tzw. fazową strukturę ruchu, która zawiera jej aspekt zewnętrzny i wewnętrzny (rys. 9). Biomechaniczna obserwacja uwzględnia powiązania kinematyczne i dynamiczne, gdzie kinematyka opisuje zewnętrzny obraz ruchu w przestrzeni i w czasie – a więc jego formę oraz charakter (tzn. efekt ruchu), natomiast dynamika wyjaśnia współdziałanie sił warunkujących strukturę kinematyczną (tzn. przyczynę ruchu). Taka propozycja podziału struktury ruchu w logiczny sposób tłumaczy występowanie ruchu. Strona wewnętrzna wiąże się z zaangażowaniem momentów sił mięśniowych tj. działanie człowieka. Natomiast struktura zewnętrzna uwzględnia czynniki spoza ludzkiego ciała, tzn. z otoczenia zewnętrznego.



Rysunek 9. Model fazowej struktury ruchu (Król, Mynarski 2005).

Analiza ruchu wraz z jego interpretacją zależy od stopnia złożoności czynności motorycznej. Zatem proces oceny powinien zostać poprzedzony odpowiednim przygotowaniem. W sporcie najczęściej stosowanym zabiegiem jest podział ruchu na mniejsze części, czyli na fazy. Klasyczny podział dla ruchów acyklicznych związany jest z celowością zadania i wyodrębnia fazy: początkową, główną, końcową. Spełniają one określone funkcje dla wykonania ruchu. Wyjaśnienie takiego podziału można ująć następująco – w fazie początkowej zostają stworzone najkorzystniejsze (pod względem mechanicznym) warunki do realizacji założonego celu ruchu, który zostaje osiągnięty w fazie głównej, po czym w fazie końcowej następuje „wygaszenie” zadania ruchowego (Król 2003). Uzasadnienie celowości poszczególnych faz nie stanowi problemu dla prostych czynności, takich jak np. wyskok z miejsca. Zadaniem fazy początkowej, określanej często jako „zamach” jest wprowadzenie mięśni w stan napięcia, wydłużenie drogi działania mięśni oraz stworzenie odpowiedniego ustawienia kąтового kończyn. Inna interpretacja dotyczy ruchów złożonych. Dla przykładu, w trakcie wykonywania salta zawodnik w fazie początkowej nie stwarza warunków do uzyskania maksymalnego wyskoku w górę, ale optymalnego. Dzieje się tak, ponieważ oprócz wysokości musi nadać ciału moment pędu. Zatem część energii przeznaczana na ruch ciała w górę a część na zapoczątkowanie obrotu (nadanie krętu) (Król 2016). Dlatego należy pamiętać, iż każdy fazowy podział ruchu jest umowny. Stosuje się podejście standardowe, jak to przytoczone, lub wskazuje konkretne kryteria dzielące ruch na poszczególne części.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Przyjęcie danej wielkości jako kryterium podziału na fazy jest dowolne, ale musi być jednoznaczne (mierzalną lub obserwowalną cechą ruchu). Najczęściej stosuje się następujące kryteria: brak kontaktu z podłożem dla wyznaczenia fazy lotu, postępowy ruch ogólnego środka ciężkości ciała (OSC) dla identyfikacji zwrotu ruchu, zmiana kątów w stawach dla określenia rodzaju ruchu obrotowego w tym stawie w przyjętej płaszczyźnie (zginanie/prostowanie, odwodzenie/przywodzenie, rotacja wewnętrzna/rotacja zewnętrzna).

### 1.4. MODELOWANIE

Powszechnie rozumiana i akceptowana jest idea modelowania matematycznego zjawisk biologicznych. Jedną z definicji modelu podaje iż jest to „twór uczyniony jako odwzorowanie przedmiotu poznania zgodnie z przyjętymi kryteriami odwzorowania, którego to tworu badania umożliwiają sformułowanie sądów odnoszących się do tegoż przedmiotu poznania” (Chłopek, Piaseczny 2001). Podstawowym celem każdego modelu jest zwiększenie zrozumienia badanego zjawiska (Hubbard 1993). Model ma dwuskładnikową strukturę — teoretyczny opis zjawiska na podstawie aktualnej wiedzy (model heurystyczny) i struktura matematyczna, w której próbuje się odzwierciedlić model heurystyczny. Kryteriami odwzorowania rzeczywistości w modelu są: podobieństwo formy (strukturalne, morfologiczne), czyli izomorfizm i/lub podobieństwo funkcji, czyli izofunkcjonalizm (Chłopek, Piaseczny 2001). Ze względu na jednoznaczność podobieństwa formy do obiektu rzeczywistego i jego funkcji, najłatwiejsze do stworzenia wydają się modele fizyczne. Badanie operacyjne zjawiska leżące u podstaw konstruowania modelu odbywa się według następujących etapów:

- 1) określenie obiektu rzeczywistego i sformułowanie problemu z nim związanego;
- 2) określenie potrzeby modelowania formalnego (matematycznego) i konkretyzacja celu modelowania;
- 3) budowa modelu formalnego uwzględniającego cel modelu;
- 4) formułowanie zadań (np. optymalizacyjnych) w języku modelu;
- 5) rozwiązywanie sformułowanych zadań;
- 6) analiza otrzymanych rozwiązań lub badanie modelu;
- 7) opracowanie projektu oddziaływania na obiekt rzeczywisty i ewentualny udział w jego wdrażaniu.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

W biomechanice stosowane są dwa rodzaje modeli fizycznych – o parametrach rozproszonych i o parametrach skupionych. Pierwsza grupa modeli charakteryzuje się tym, że geometria ciała lub fragmentu ciała człowieka jest dokładnie odwzorowywana za pomocą bardzo dużej liczby tzw. elementów skończonych. Tym elementom należy przypisać określone właściwości geometryczne i materiałowe w zależności od celu rozwiązywanego zadania. Modele te charakteryzuje duża szczegółowość, a ponadto wymagają znajomości wielu cech ciała i właściwości różnych tkanek. O ich złożoności może świadczyć liczba elementów niezbędnych do ich tworzenia. W modelu ‘AnyBody’ uwzględnionych jest ponad 1000 jednostek mięśniowych (Rasmussen et al. 2002), natomiast model ‘THUMS’ (Total Human Model for Safety) stworzono z ponad 80 000 części (Iwamoto et al. 2002). Symulacje w tych modelach zasadniczo zależą od eksperymentów i próby włączenia danych eksperymentalnych do oprogramowania symulacyjnego. Mają jednak bariery takie jak skomplikowanie i ograniczona dostępność (Reinbolt, Seth, Delp 2011). Z tego powodu w naukowym opisie i modelowaniu ruchów człowieka stosuje się najczęściej modele fizyczne o parametrach skupionych (Aggarwal, Cai 1999). Stosowanie takich modeli ma znaczenie i uzasadnienie wtedy, kiedy głównym celem jest zrozumienie czynności ruchowej (Alexander 1995). Szczególnie, że najbardziej podstawowe zrozumienie zjawiska ma podłoże w najprostszych modelach (Hubbard 1993), co potwierdzają stwierdzenia, że „prostota jest sprzymierzeńcem zrozumienia” (McGeer 1990) oraz że „im prostszy model, tym łatwiej odkryć, które z jego cech są istotne dla obserwowanego efektu” (Alexander 1992).

### *1.4.1. MODELE O PARAMETRACH SKUPIONYCH*

Modele o parametrach skupionych charakteryzuje większe uproszczenie niż w modelach o parametrach rozproszonych. Układ ruchu człowieka (lub jego część) jest rozpatrywany jako układ wielocłonowy. Taki biomechanizm zbudowany jest ze sztywnych członów połączonych ze sobą przegubami (stawami), napędzanych poprzez siły rozwijane przez mięśnie (lub zespoły mięśni) (Zatsiorsky 1998). Modele w postaci łańcucha brył sztywnych mają więc ograniczoną liczbę cech fizycznych. Wykorzystywane są także modele o innych właściwościach fizycznych niż ciała sztywne np. o masach drgających („wobbling mass model”) (Gruber et al. 1998; Pain, Challis 2004). Natomiast szczególnym przypadkiem są modele punktowe. Ciało człowieka jest w nich zredukowane do jednego reprezentacyjnego punktu, którego zachowanie podczas czynności motorycznych traktowane jest jako odwzorowanie ruchu całości układu.



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Najczęściej wybieranym punktem jest środek masy ciała (COM – ang. center of mass). Model ten jest powszechnie używany do opisu i badania najlepiej poznanych ruchów człowieka, tj. kontroli postawy (Błaszczuk et al. 2003; Clifford, Holder-Powell 2010; Kiers et al. 2013; Słomka et al. 2013) i chodu (Alexander 1992; MacKinnon, Winter 1993, Alexander 1995, Usherwood et al. 2018). Stosuje się go do identyfikacji przemieszczeń liniowych całego ciała w globalnym układzie odniesienia (Hay 1993; Bartlett 2007; Knudson, 2007; Król et al. 2016). Jego główne ograniczenie stanowi brak możliwości odwzorowania zaistniałych ruchów obrotowych. Dlatego dla dokładniejszego zobrazowania ruchu ciała człowieka taki model powinno się uzupełnić poprzez inne dodatkowe elementy, tj. cechy ciała poruszającego się ruchem obrotowym. Taką możliwość daje model elipsoidy bezwładności. Do tej pory został zastosowany do opisu kinematyki i kinetyki ruchów złożonych jedynie dwa razy – przez Luciano Allegretti’ego Mercadante w analizie skoku w dal z miejsca (za (Zatsiorsky 1998) i w technice kopnięcia w capoeira (Mercadante 2000) oraz w modelowaniu salta w tył robota (Park G., Park J.H. 2012). Zagadnienie osi głównych w naukach medycznych i naukach o sporcie było poruszane w literaturze stosunkowo rzadko. Można znaleźć opracowania dotyczące trzech kontekstów: właściwości bezwładnościowych poszczególnych segmentów ciała (Pearsall, Reid 1994; Erdmann 1999; McConville et al. 1980; Damavandi et al. 2009; Chen et al. 2011), orientacji ciała w przestrzeni w pozycji anatomicznej (Zatsiorsky 1998) oraz automatycznego rozpoznawania ciała ludzkiego w komputerowych metodach analizy obrazu wizyjnego (Rocha, Velho, Carvalho 2004; Vatavu et al. 2006; Hu et al. 2006).

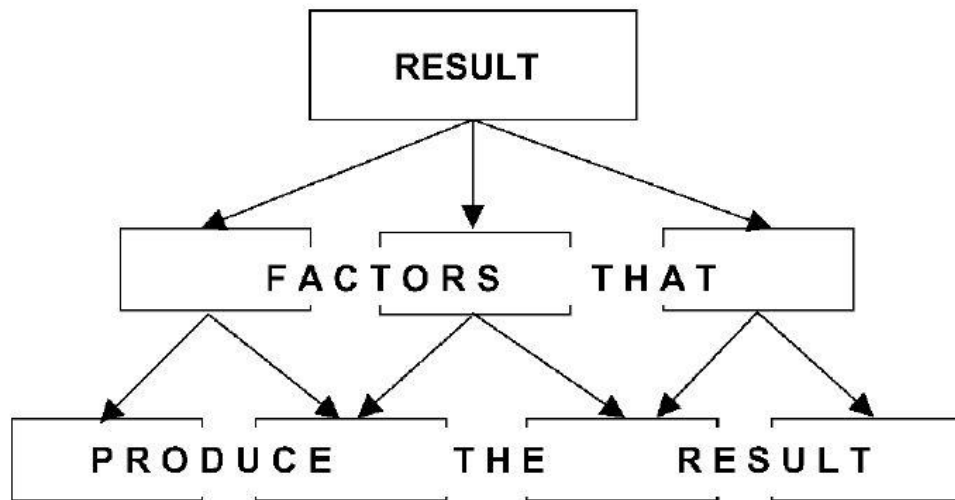
### *1.4.2. DETERMINISTYCZNY MODEL RUCHU*

Nie wszystkie zmienne opisujące strukturę ruchu mają wpływ na jego cel. Należy określić, które czynniki są istotne dla uzyskania efektu końcowego. Dlatego rozróżnia się wielkości opisujące i wpływające (Król 2016). Te pierwsze to często dane pomiarowe, które mogą okazać się nadmiarowe przy charakteryzowaniu zjawiska. W związku z tym w początkowym etapie planowania powinno się skupić uwagę na szukaniu zależności funkcyjnych między daną zmienną a wielkością celową, czyli na wyodrębnieniu zmiennych oddziałujących na zakładany cel zadania. Taka koncepcja doboru wielkości fizycznych służących późniejszej ocenie całości ruchu jest podstawą do stworzenia deterministycznego modelu analizy jakościowej techniki ruchu, który został zaproponowany w 1982 roku przez Jamesa Hay’a w książce „Anatomy, mechanics and human motion”. Dopiero w drugim jej wydaniu (1988) uzyskał nazwę

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

„deterministyczny” (za Lees 2002). Mimo, iż w literaturze utrwała się ta nazwa (Bartlett 2007), to można także znaleźć go pod terminami: „factors-results model”, „hierarchical model”, „performance outcome model” czy „qualitative model” (Lees 2002).

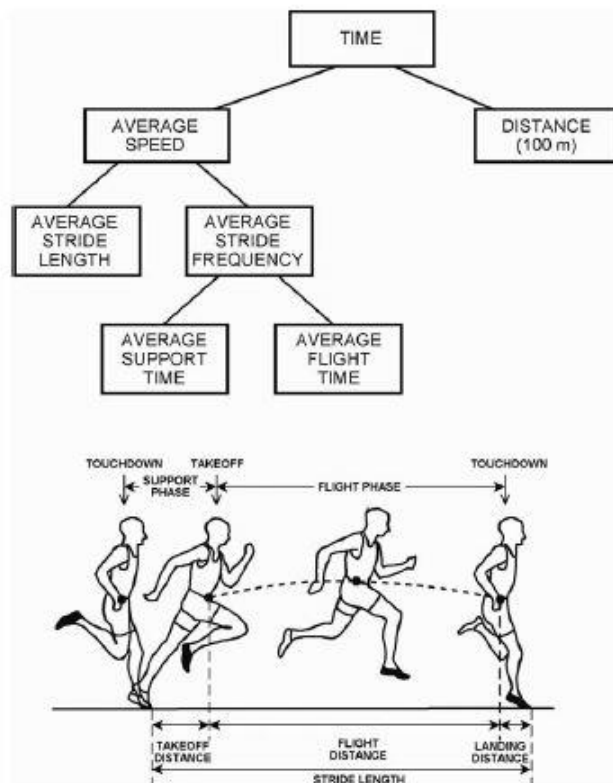
Jest to graficzne przedstawienie hierarchicznej struktury wpływu wielkości fizycznych na rezultat zadania ruchowego (rys. 10). Na szczycie zostaje umieszczona wielkość finalna (celowa) ruchu, natomiast na poziomach poniżej zmienne wpływające na rezultat ruchowy według stopni zależnych od oddziaływania na cel – bezpośrednio i pośrednio.



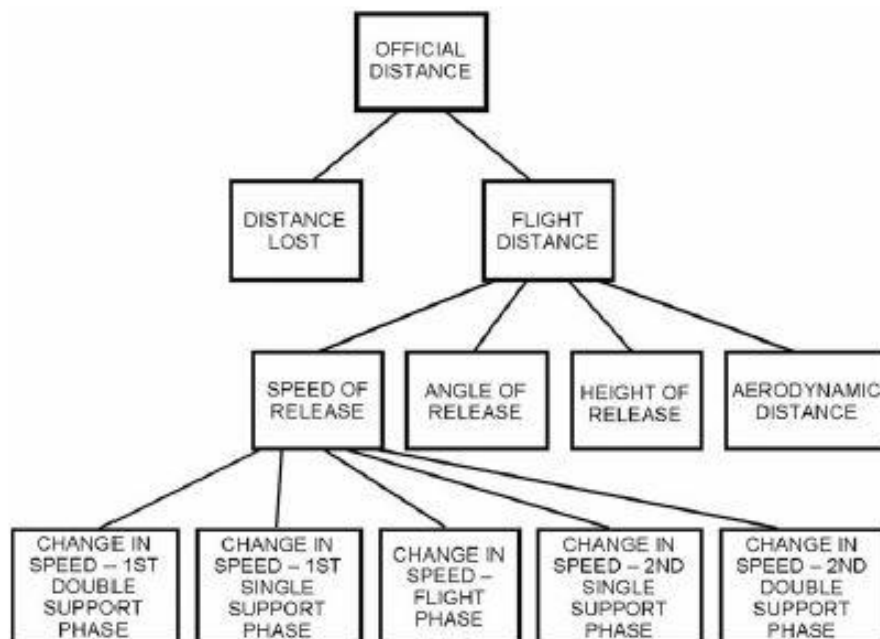
Rysunek 10. Struktura i forma modelu deterministycznego (Lees 2002).

Modele deterministyczne pojawiają się w literaturze zarówno jako rozpoczęcie analizy zjawiska (Ham, Knez, Young 2007), bądź jako efekt końcowy pracy (Takei 2007). Jednakże jego tworzenie w każdym przypadku obejmuje te same etapy: dedukcyjne rozłożenie całościowego wyniku czynności ruchowej na składniki cząstkowe (poprzez uwzględnienie praw i zasad mechaniki); określenie biomechanicznych wielkości wpływających na wybrane wcześniej cząstkowe składniki; ocena stopnia wpływu tych wielkości na całościowy wynik lub na jego składniki cząstkowe. Model ten może stanowić punkt wyjścia i teoretyczną podstawę do badań biomechanicznych w sportach, pomagając w ten sposób wyjaśnić, zamiast jedynie opisywać mechaniczne aspekty wyników sportowych. Stosowanie takiego podejścia w badaniach biomechanicznych zostało przedstawione w przeglądowej pracy (Chow, Knudson 2011). Autorzy podają, iż na przestrzeni lat jego główne wykorzystanie pojawiło się w analizie techniki ruchu w pływaniu, lekkiej atletyce (rys. 11, rys. 12) i gimnastyce.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**



Rysunek 11. Model sprintu na 100m wraz z ilustracją wybranych charakterystyk kinematycznych kroku biegowego (Chow, Knudson 2011).



Rysunek 12. Model rzutu dyskiem zaadaptowany przez Chow, Knudson (2011) z modelu Hay, Yu (1995).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Jako najważniejsze zalety modelu deterministycznego wskazali: brak przypadkowości w doborze zmiennych, obiektywność w identyfikowaniu czynników, teoretyczną podstawę do badania względnego znaczenia różnych czynników wpływających na wynik zadania ruchowego. Zwrócili także uwagę na słabe strony modelu takie jak subiektywność w wyborze liczby poziomów modelu, szczególnie kiedy zaproponowane zmienne wpływające są również zależne od samych siebie. Należy pamiętać, że większy udział zmiennych rozszerza badanie, nakładając większe wymagania w ich przeprowadzeniu. Jednakże w podsumowaniu zdecydowanie zaleca się, aby specjaliści zajmujący się biomechaniką sportu rozważali jego stosowanie w swoich pracach (Chow, Knudson 2011).

## ROZDZIAŁ II

### PROBLEMATYKA BADAWCZA

Głównym celem rozprawy jest opracowanie i walidacja matematycznego modelu fazy lotu w snowboardowym saltcie „wildcat”.

#### **ETAPY MODELOWANIA:**

- 1) opisanie struktury kinematycznej fazy lotu w pojedynczym saltcie „wildcat”;
- 2) identyfikacja zmienności ruchów w fazie lotu w pojedynczym saltcie „wildcat”;
- 3) opracowanie modelu fazy lotu pojedynczego salta „wildcat” przy użyciu modelu punktowego i modelu elipsoidy bezwładności ciała z uwzględnieniem zmienności ruchów i warunków początkowych;
- 4) określenie warunków wykonania fazy lotu w podwójnym saltcie „wildcat” na podstawie modelu;
- 5) walidacja modelu poprzez porównanie uzyskanych w fazie lotu wyników podwójnego salta „wildcat” z wynikami empirycznymi.

## ROZDZIAŁ III

Rozprawa doktorska jest elementem projektu zrealizowanego w ramach programu „Rozwój Sportu Akademickiego” pod tytułem: „Dobór warunków wykonania salt w treningu ukierunkowanym narciarzy i snowboardzistów weryfikowany obiektywną kontrolą techniki sportowej” (nr 0014/RS4/2016/54). Projekt uzyskał pozytywną opinię Uczelnianej Komisji Bioetycznej ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach – opinia 10/2016 z dnia 10 marca 2016 roku.

### MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

#### 3.1. MATERIAŁ BADAWCZY

Zastosowano celowy dobór do badań. Grupa badana składała się z 7 zawodników konkurencji freestyle’owych w snowboardzie potrafiących wykonać pojedyncze salto „wildcat”. Ponadto badani byli uczestnikami kursu instruktorskiego Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach w specjalizacji snowboard, posiadającymi minimum 3 klasę sprawności według Stowarzyszenia Instruktorów i Trenerów Snowboardu (SITS). Dodatkowo 2 osoby potrafiły wykonać podwójne salto „wildcat”. Charakterystyka grupy została przedstawiona w tabeli 1, wskazano także typ snowboardzistów z uwagi na ustawienie kończyn dolnych, tj. „wiodącej i tylnej” (tab. 2). Badani byli pełnoletni, zostali poinformowani o celu eksperymentu i przed rozpoczęciem pomiarów wyrazili pisemną zgodę na swoje uczestnictwo. Ponadto powiadomiono ich o możliwości rezygnacji z udziału w dalszym badaniu w dowolnym momencie. Kryteria włączenia stanowiły: umiejętność wykonania pojedynczego salta „wildcat” oraz doświadczenie w poruszaniu się na drewnianej „rampie” na desce wyposażonej w kółka. Kryterium wyłączenia stanowiły: przebyty uraz sportowy, którego skutki spowodowały ograniczenia sprawności fizycznej bądź ruchowej oraz pojawienie się bólu przed lub podczas wykonania zadania.

*Tabela 1. Charakterystyka badanej grupy.*

n	Wiek [lata]		Wysokość ciała [cm]		Masa ciała [kg]	
	średnia	SD	średnia	SD	średnia	SD
7	25	4.3	177	7.0	72	12.9

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Tabela 2. Typ snowboardzistów biorących udział w badaniach.

n	TYP SNOWBOARDZISTY	
	„Regular”	„Goofy”
7	3	4

### 3.2. MIEJSCE BADAŃ

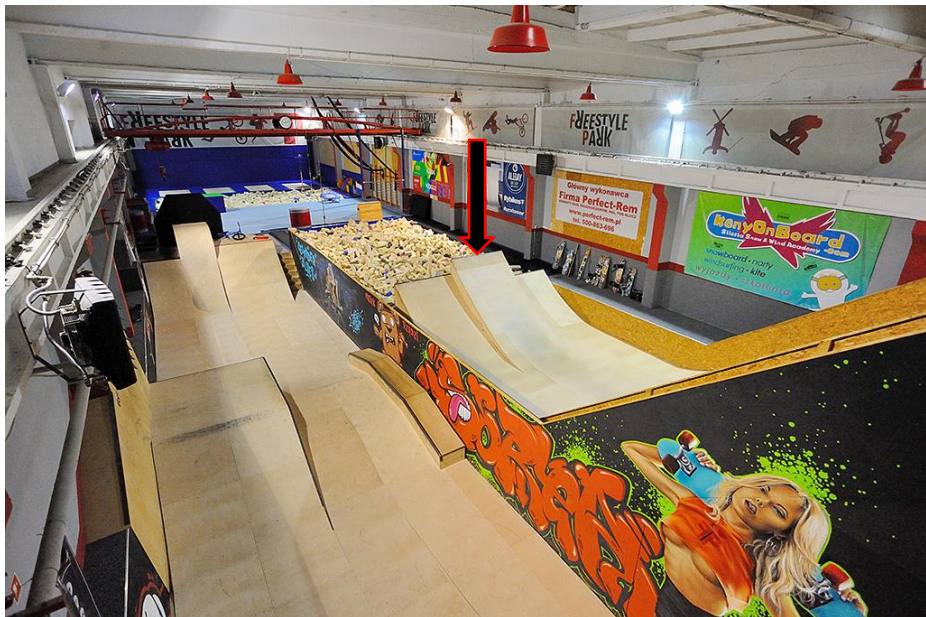
Ze względu na specyfikę badanego ruchu eksperyment został zrealizowany w przystosowanym do tego miejscu, tj. w obiekcie „Freestyle Park” w Chorzowie, stanowiącym bazę do nauczania ewolucji freestyl’owych. Hala wyposażona jest m.in. w specjalne „rampy zjazdowe freestyle” z polem lądowania w postaci „dołu” wypełnionego gąbkami (rys. 13, rys. 14, rys. 15). Służy to zapewnieniu bezpieczeństwa podczas lądowania, szczególnie w procesie uczenia się. Po nawierzchni skoczni badani poruszali się na celowo przygotowanych do tego deskach snowboardowych z kółkami zamontowanymi przez specjalistyczną firmę (rys. 16). Najazd charakteryzował się następującymi parametrami: wysokość platformy startowej (mierzona do najniższego miejsca na najeździe do miejsca startu) – 5.6 m; długość najazdu (mierzona od platformy startowej do progu skoczni) – 16.6 m; wysokość progu (mierzona od progu skoczni do najniższego miejsca na najeździe) – 2.3 m; kąt progu rampy – 30°.

Wszystkie badane skoki zostały wykonane w pełnej formie przestrzennej, odzwierciedlając warunki terenowe, ponieważ „rampy” odpowiadają konstrukcyjnie tym naturalnym (on-snow). Natomiast fakt, iż posiadają stałą (drewnianą) nawierzchnię oraz że znajdują się w pomieszczeniu zamkniętym, standaryzuje warunki klimatyczne (ruch powietrza, temperatura, opady) i mechaniczne (współczynnik tarcia, geometria rampy), stwarzając dodatkowo warunki laboratoryjne – powtarzalne i zoptymalizowane dla wszystkich uczestników.

- ROZPRAWA DOKTORSKA -



Rysunek 13. Rampy zjazdowe w „Freestyle Park” – widok z góry. Rejestracji trików dokonywano na największej, tj. środkowej rampie (oznaczonej strzałką).



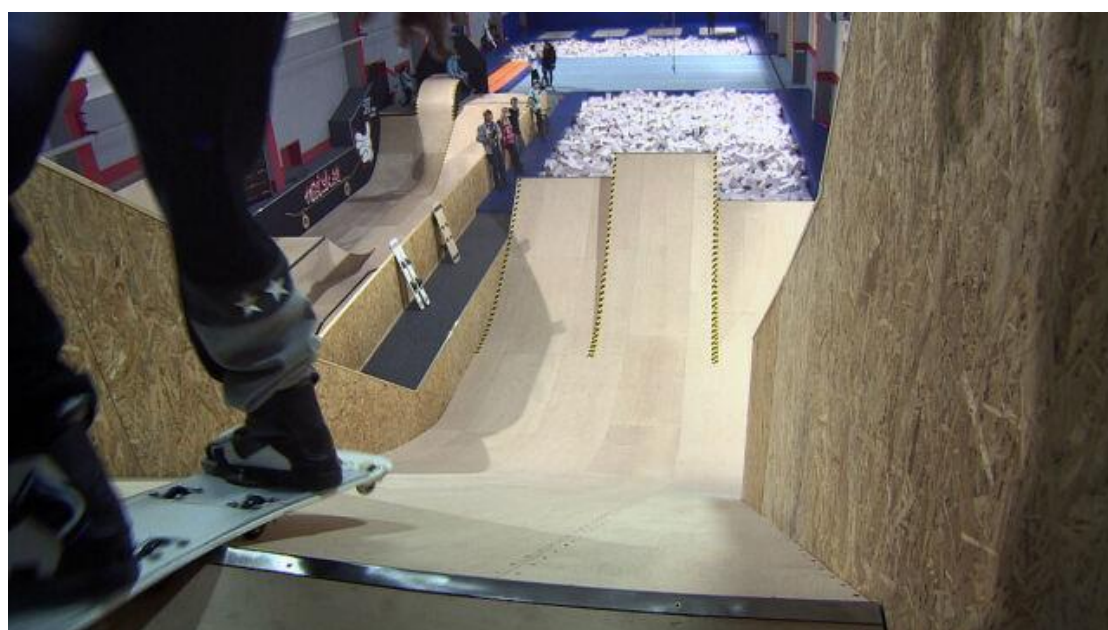
Rysunek 14. Rampy zjazdowe w „Freestyle Park” – widok z boku.



- ROZPRAWA DOKTORSKA -



Rysunek 15. Widoczne pole lądowania w postaci „dołu” wypełnionego gąbkami.



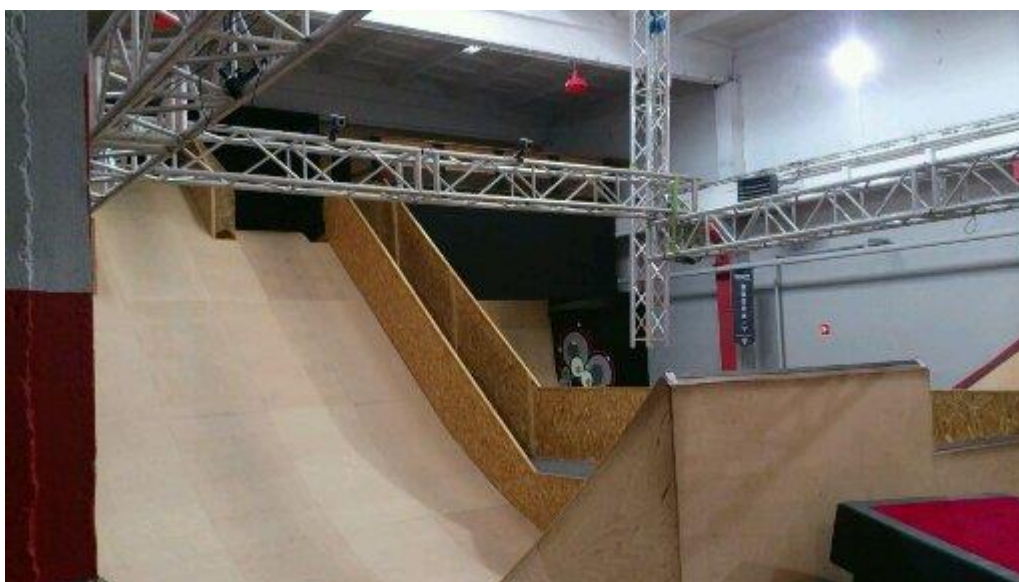
Rysunek 16. Specjalnie przygotowana deska snowboardowa z zamontowanymi kółkami.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### 3.3. NARZĘDZIA BADAWCZE

Badania wykonano używając dwóch systemów pomiarowych – **systemu optoelektronicznego** Vicon Motion Systems oraz **systemu video**. Aparatura pierwszego systemu składała się z 10ciu kamer ‘NIR MX-T40 Bonita 10’ umieszczonych na specjalnie przygotowanej kratownicy o wymiarach 12m x 6m, zawieszanej na wysokości 3m nad progiem rampy. Tym samym został wyznaczony obszar rejestrowanego ruchu w postaci walca zbudowanego na podstawie o osiach 6.47m i 4.2m (rys. 17). Natomiast drugi tworzyły 4 kamery wizyjne (RGB) ‘GC-PX100BEV’ (JVC, Japonia), usytuowane na stabilnych statywach w odległościach zapewniających widoczność całej fazy lotu (rys. 18), które zostały uzupełnione sześciennym układem odniesienia (o wymiarach 1x1x2m) oraz synchronizatorem wizyjnym LED. Częstotliwość nagrywania dla systemu optoelektronicznego wynosiła 100Hz a dla systemu video 50Hz. Dla uzyskania jak największej dokładności, nagrań video dokonano zgodnie z zasadami i rekomendacjami dla rejestracji trójwymiarowego lotu (Theriault et al. 2014).

Do stworzenia modelu ciała człowieka w systemie Vicon Motion Systems wykorzystano oprogramowanie Nexus wraz z protokołem rozmieszczenia markerów według Plug-in-Gate (rys. 19). Oprócz standardowych 39 biernych markerów umocowano dodatkowo 4 markery – dwa na krańcach deski snowboardowej oraz dwa na zewnętrznych krawędziach progu rampy.



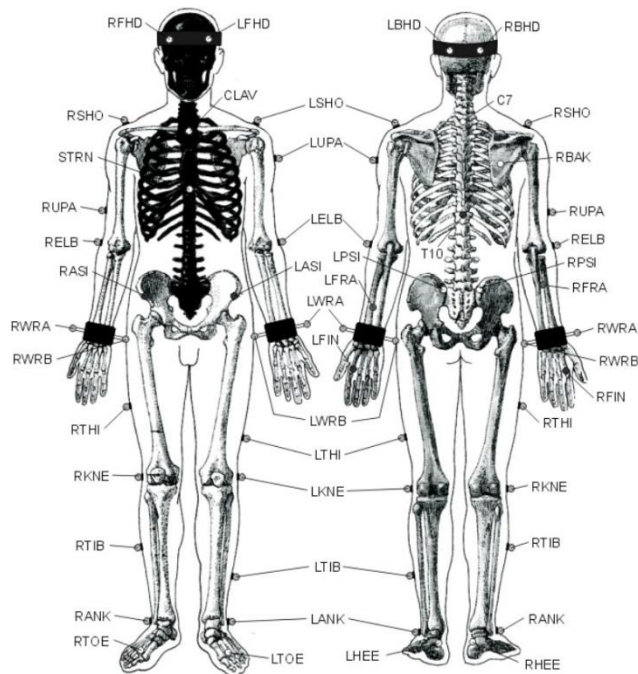
*Rysunek 17. Rozmieszczenie kamer systemu optoelektronicznego na kratownicy (widoczne 3 kamery ‘Bonita’).*





Rysunek 18. Widok stanowiska pomiarowego. Na pierwszym planie krawędź rampy z markerami, kratownica z kamerami 'Bonita' oraz jedna z kamer systemu video (widoczna po lewej stronie zdjęcia).

### Plug-in-Gait Marker Placement



Rysunek 19. Rozmieszczenie markerów według protokołu Plug-in-Gate (Clark et al. 2016).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### 3.4. PROTOKÓŁ POMIAROWY

Uczestnicy wykonywali 10 poprawnie wylądowanych salt „wildcat”. Za takie uznawano salto, w którym podczas lądowania w dole z gąbkami pierwszy kontakt z podłożem miała deska snowboardowa. Natomiast osoby potrafiące wykonać podwójne salto realizowały odpowiednio 5 ewolucji pojedynczych i 5 podwójnych. Przerwy wypoczynkowe pomiędzy skokami (wliczając czas powrotu na platformę startową) badani wybierali indywidualnie i trwały od 3 do 5 minut.

Sesja skoków została poprzedzona przeprowadzeniem niezbędnych pomiarów antropometrycznych według instrukcji Vicon Motion Systems (tab. 3), po czym na ciele badanego zostały umieszczone markery zgodnie z protokołem rozmieszczenia (rys. 19). Następnie zawodnik wykonywał indywidualną rozgrzewkę (trwającą do 15 minut), której czas i rodzaj ćwiczeń dobierał zgodnie z własnym doświadczeniem. W jej skład wchodziły także 2 skoki „ollie” tzn. bez obrotów. Deski snowboardowe wraz z kaskiem ochronnym zostały dobrane indywidualnie (rys. 20). Wszyscy badani wcześniej trenowali już w obiekcie „Freestyle Park”, dlatego byli zaznajomieni z warunkami wykonywania ewolucji (kryterium włączenia).

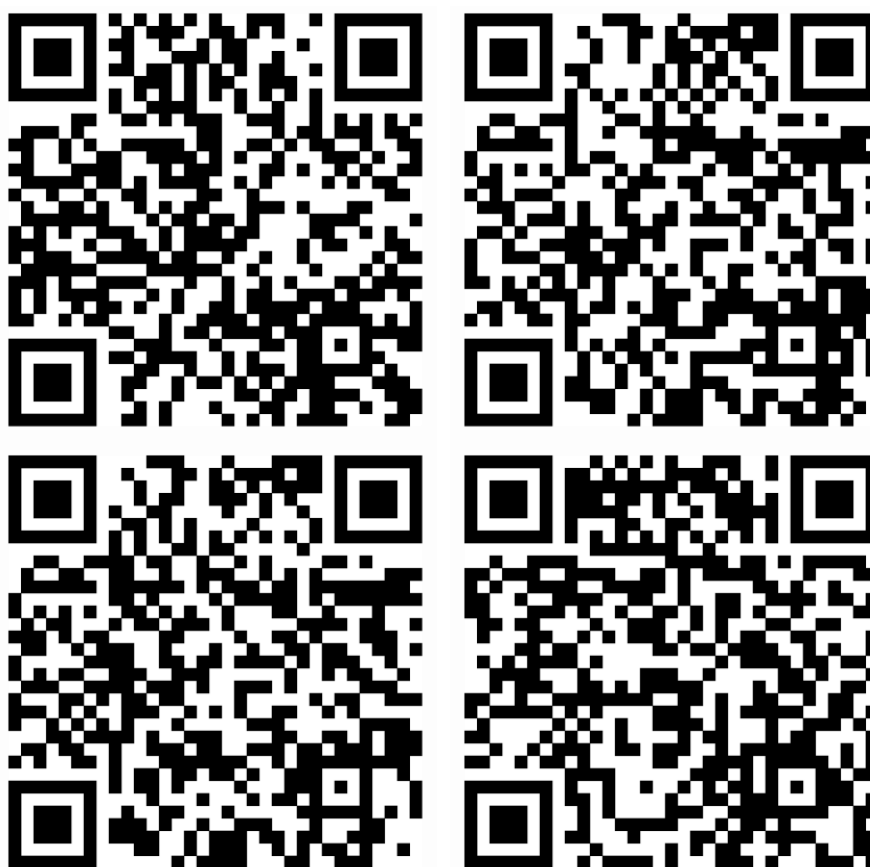
Przykładowe próby zarejestrowane podczas pomiarów można zobaczyć na materiale filmowym, do których dostęp zostanie uzyskany po zeskanowaniu kodów QR (rys. 21). Na filmach widoczne jest także miejsce badań oraz rozmieszczenie kamer systemu Vicon.

*Tabela 3. Pomiary antropometryczne osoby badanej niezbędne do wyliczeń w systemie Vicon.*

<b>POMIAR OGÓLNY</b>	Masa ciała
	Wysokość ciała
<b>POMIAR DOLNEJ CZĘŚCI CIAŁA</b>	Długość kończyn dolnych
	Szerokość stawu kolanowego
	Szerokość stawu skokowego
<b>POMIAR GÓRNEJ CZĘŚCI CIAŁA</b>	Odległość pomiędzy stawami ramiennymi
	Szerokość stawu łokciowego
	Szerokość stawu promieniowo-nadgarstkowego
	Grubość głowy 3. kości śródreżca



Rysunek 20. Rozmieszczenie markerów na badanym zawodniku i sieci snowboardowym.



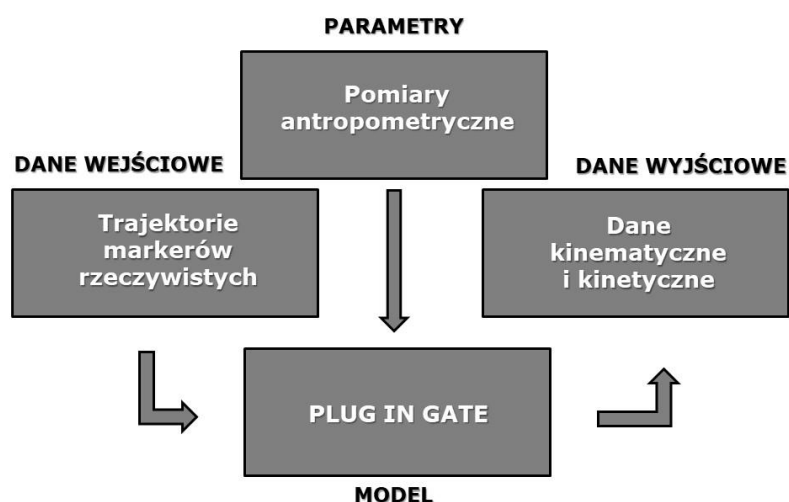
Rysunek 21. Odnośniki do materiału filmowego w postaci kodów QR do przykładowych salt „wildcat” zarejestrowanych podczas badań.

### 3.5. UZYSKANIE DANYCH POMIAROWYCH

Plug-in-Gait to nazwa używana przez system Vicon (Vicon, USA) do implementacji tak zwanego „konwencjonalnego modelu chodu” (CGM – Conventional Gait Model). CGM to ogólna nazwa modeli biomechanicznych kończyn dolnych stosowanych do analizy chodu (Kadaba et al. 1989; Kadaba et al. 1990; Davis et al. 1991). Zawiera cztery moduły modelujące:

- 1) model kinematyczny dolnej części ciała,
- 2) model kinematyczny górnej części ciała,
- 3) model kinetyczny dolnej części ciała,
- 4) model kinetyczny górnej części ciała.

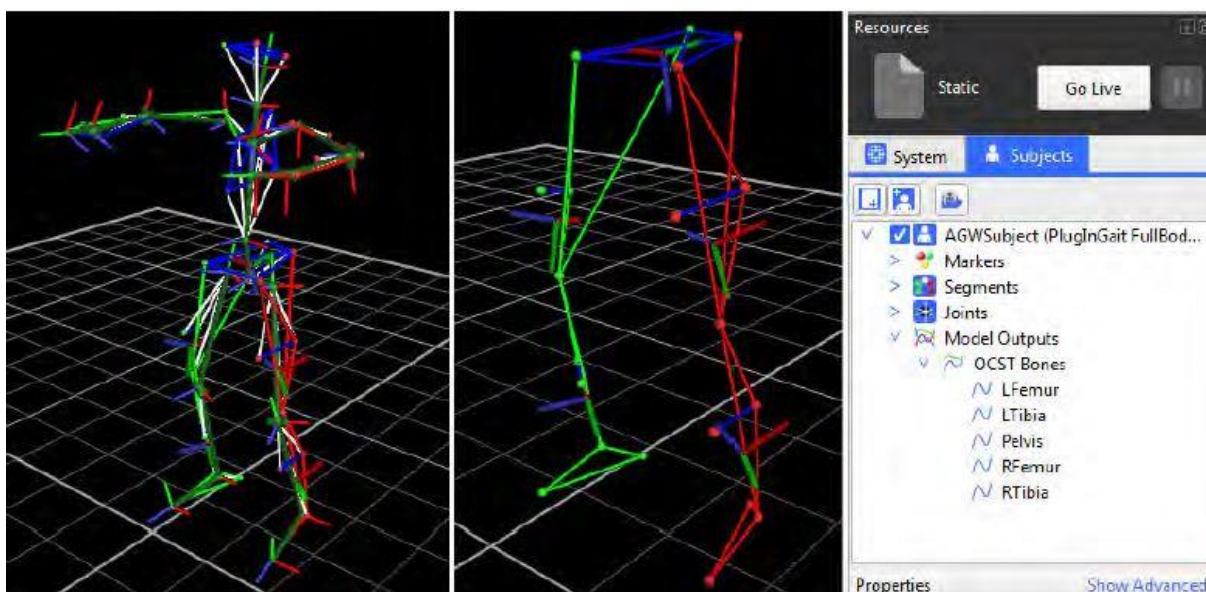
Uzyskanie danych kinematycznych z systemu wiąże się z „poklatkowym” modelowaniem markerów wirtualnych na podstawie pomiarów antropometrycznych badanego i trajektorii przemieszczeń markerów rzeczywistych umieszczonych na ciele badanego zgodnie z przyjętym protokołem rozmieszczenia. Natomiast dane kinetyczne uzyskiwane są z wykorzystaniem platformy dynamograficznej, bądź (w przypadku jej braku) przy użyciu procedury dynamiki odwrotnej (rys. 22). Należy pamiętać, iż dla stworzenia modelu w badaniu podczas całego pomiaru musi być widoczna niezbędna (minimalna) liczba markerów rzeczywistych, tj. markery miednicy dla odtworzenia dolnej części ciała oraz markery klatki piersiowej dla identyfikacji górnej części ciała (rys. 23, rys. 24).



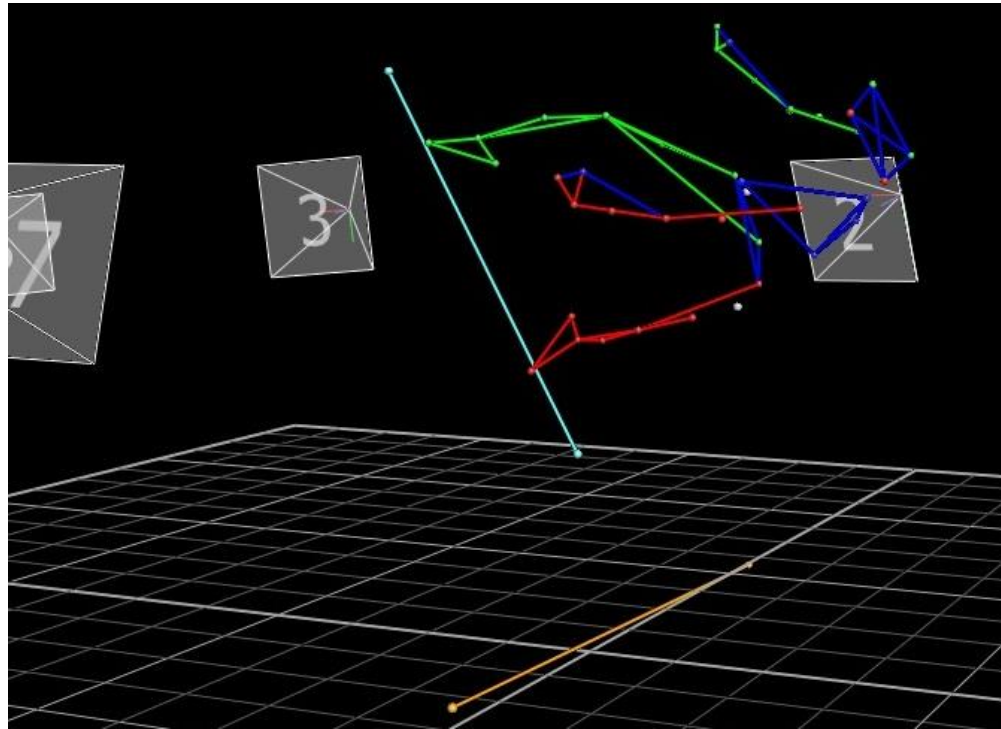
Rysunek 22. Poglądowy schemat modelowania wykorzystywany w systemie Vicon.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

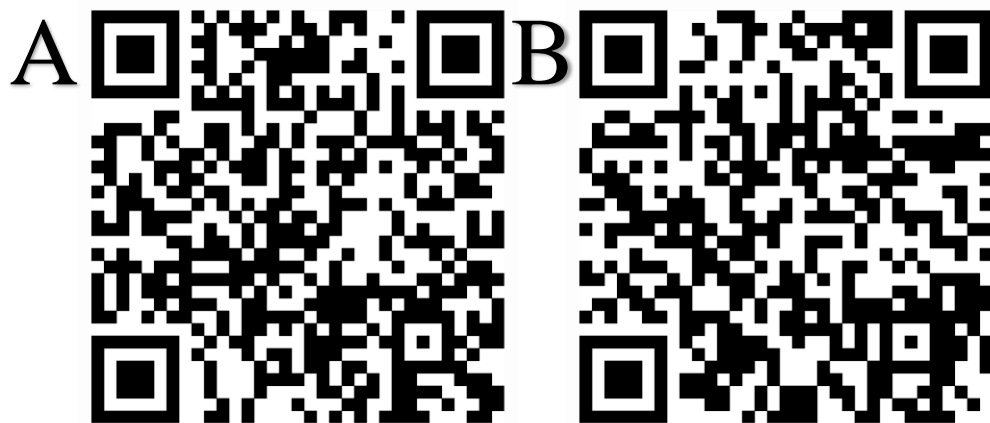
Dane wyjściowe generowane przez oprogramowanie Nexus są zapisywane w postaci plików w formacie c3d (międzynarodowy standard zapisu danych dla systemów analizy ruchu) oraz plików tekstowych csv (comma-separated values, wartości rozdzielone przecinkiem). Standardowo dane kinematyczne stanowią opisane za pomocą współrzędnych kartezjańskich (x, y, z) trajektorie przemieszczeń poszczególnych markerów rzeczywistych wraz z ich pochodnymi (prędkość, przyspieszenie) oraz ruchy obrotowe w stawach przedstawione w kątach Eulera. Dzięki kalibracji systemu przyporządkowuje się następujące oznaczenia dla osi układu współrzędnych, tj. z – oś pionowa, y – oś pozioma w płaszczyźnie realizacji ruchu, x – oś pozioma prostopadła do płaszczyzny realizacji ruchu. Kod QR do materiału filmowego, który obrazuje badanego podczas pomiaru w systemie Vicon został umieszczony na rysunku 25.



Rysunek 23. Przykładowe zobrazowanie badanego w systemie Vicon (Vicon Motion Systems, User Guide, 2015).



Rysunek 24. Wizualizacja badanego w systemie Vicon w oprogramowaniu Nexus (dane z pomiaru). Widoczne markery na rampie, badanym, desce snowboardowej oraz lokalizacja kamer (nr 2, nr 3 i nr 7).

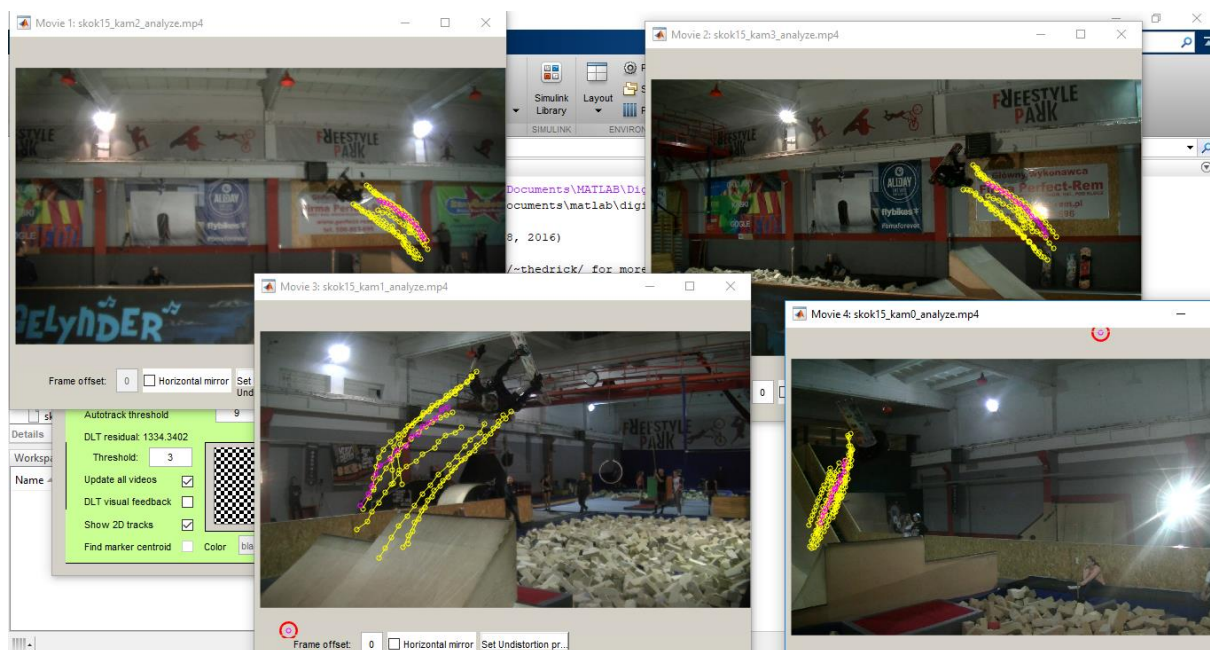


Rysunek 25. Odnośniki do materiałów filmowych w postaci kodów QR zawierających wykonanie salta pojedynczego (A) oraz podwójnego (B) widoczne w systemie Vicon oprogramowania Nexus w zwolnionym tempie.

Parametry kinematyczne z systemu video uzyskano dzięki skryptom napisanym w środowisku 'MATLAB' wraz z przybornikiem udostępnionym przez Hedrick Lab (rys. 26), który został opracowany dla analizy filmowej kinematyki układów biologicznych (Hedrick 2008).



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -



Rysunek 26. Trajektorie wybranych punktów widoczne z 4 kamer. Etap obróbki danych video w skrypcie MATLAB.

Szeregi czasowe dla modeli (punktowego i elipsoidy bezwładności ciała) zostały wyliczone przy pomocy autorskiego pakietu skryptów w środowisku 'MATLAB' (napisanego w Zakładzie Biomechaniki Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach).

Ze względu na złożoność wykonywanego ruchu oraz specyfikę warunków pomiarowych mimo poprawnego zarejestrowania skoków nie udało się uzyskać kompletnych danych dla wszystkich prób. Głównie było to związane z zasłonięciem markerów znajdujących się na przedniej części miednicy (kolce biodrowe przednie górne: prawy – RASI, lewy – LASI) (rys. 19). Zestawienie wszystkich wykonanych skoków przedstawia tabela, w której uwzględniono liczbę zarejestrowanych prób i liczbę prób poddanych dalszej analizie (kompletnych) (tab. 4).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Tabela 4. Liczba wykonanych pojedynczych salt „wildcat” podczas eksperymentu.

nr zawodnika	liczba wykonanych salt pojedynczych		
	wszystkich wykonanych	w tym poprawnie wylądowanych	z których uzyskano kompletne dane
1	5	5	2
2	12	10	7
3	13	10	10
4	10	10	5
5	11	10	8
6	13	10	8
7	5	5	5
<b>suma</b>	<b>69</b>	<b>60</b>	<b>45</b>

### 3.6. OPRACOWANIE DANYCH POMIAROWYCH

Do opisu ruchu postępowego posłużył najczęściej używany w literaturze **model punktowy** ciała człowieka (COM). Mimo, iż punkt ten został pierwotnie wyliczony bezpośrednio z systemu Vicon trzeba było wyliczyć go ponownie, gdyż nie uwzględniał obecności deski snowboardowej. Zastosowano niestandardową procedurę, mającą na celu wyznaczenie położenia środków poszczególnych stawów (tj. osi obrotu). Następnie przyjęto współczynniki długościowe i ciężarowe według Zatsiorskiego (1998). Wyodrębniono 14 segmentów ciała, którym został przypisany procentowy udział ich masy wraz z położeniem środka ciężkości. Na potrzeby badania uwzględniono dodatkowy 15 człon, którym był set snowboardowy (deska snowboardowa wraz z butami i wiązaniami). Przyjęto, iż jego masa stanowiła 10% masy ciała badanego, a środek ciężkości setu znajdował się w środku deski. Powstał zatem środek masy układu ‘zawodnik + set snowboardowy’ jako COM2, dla którego wyliczono zmienne kinematyczne: położenie, prędkość i przyspieszenie w osiach pionowej i poziomej w kierunku lotu, jak i kinetyczne: energia kinetyczna, energia potencjalna i energia całkowita dla ruchu postępowego.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Do opisu ruchu obrotowego zastosowano nowatorskie podejście, w którym przyjęto że moment bezwładności ciała człowieka<sup>1</sup> wokół osi głównych reprezentuje ciało człowieka w dowolnej pozycji. Efektem pracy było stworzenie **modelu elipsoidy bezwładności**, który określał zmiany głównego, tj. sumarycznego momentu bezwładności oraz zmiany momentów bezwładności ciała człowieka wokół jego osi głównych. Algorytm obliczeniowy wykonano w środowisku Matlab. Wprowadzono normalizację masy zawodnika wraz z setem snowboardowym do wartości 1, aby w dalszych etapach móc porównywać znormalizowany sumaryczny moment bezwładności w poszczególnych próbach niezależnie od tego, który z zawodników je wykonywał. Z punktu widzenia kinematyki ruchu obrotowego każdą trójwymiarową bryłę sztywną kompletnie opisuje tensor bezwładności. Bez względu na to jak bardzo skomplikowana jest geometria ciała, bezwładność w ruchu obrotowym opisuje 6 liczb: trzy momenty bezwładności  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$  oraz trzy momenty dewiacyjne  $I_{xy}$ ,  $I_{xz}$ ,  $I_{yz}$ . W przypadku dyskretnego rozkładu masy, jaki przyjmujemy w naszych obliczeniach (w przeciwieństwie do ciągłego rozkładu, gdzie pojawiają się całki), momenty są opisywane następującymi wzorami:

$$I_{xx} = \sum_{\text{części ciała}} m_i (y_i^2 + z_i^2) \quad I_{yy} = \sum_{\text{części ciała}} m_i (x_i^2 + z_i^2) \quad I_{zz} = \sum_{\text{części ciała}} m_i (x_i^2 + y_i^2)$$

$$I_{xy} = - \sum_{\text{części ciała}} m_i x_i y_i \quad I_{xz} = - \sum_{\text{części ciała}} m_i x_i z_i \quad I_{yz} = - \sum_{\text{części ciała}} m_i y_i z_i$$

gdzie  $m_i$  oznacza masę danej części ciała a  $(x_i, y_i, z_i)$  opisuje jej położenie względem środka masy. Choć można opisać tensor bezwładności względem dowolnego układu współrzędnych, to dla prostoty w tych rozważaniach początek układu współrzędnych będzie się zawsze pokrywał ze środkiem masy. Innymi słowy jeśli mierzone współrzędne to  $(X_i, Y_i, Z_i)$  to:

$$x_i = X_i - \frac{\sum_{\text{części ciała}} m_i X_i}{\sum_{\text{części ciała}} m_i} \quad (\text{analogicznie dla współrzędnych } y \text{ - i } z).$$

Momenta bezwładności i momenta dewiacyjne są składowymi tensora bezwładności, który w sposób zwięzły może być zapisany jako macierz

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}.$$

---

<sup>1</sup> Suma iloczynów każdej masy części ciała i kwadratu jej odległości od osi obrotu.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Fakt, że  $I$  jest tensorem oznacza, że charakterystyka bezwładności bryły sztywnej nie zależy od wyboru układu współrzędnych. Obserwatorzy mierzący momenty bezwładności i momenty dewiacyjne w różnych układach współrzędnych mogą porównać swoje pomiary o ile znają przekształcenie pomiędzy własnymi układami odniesienia. Z matematycznego punktu widzenia  $I$  jest symetryczną macierzą o wyrazach rzeczywistych, co oznacza, że ma ona rozkład diagonalny przez macierz ortogonalną. Fizyczna interpretacja tego faktu jest następująca: bryła sztywna ma uprzywilejowany układ odniesienia w którym wszystkie momenty dewiacyjne są równe zero (a  $I$  jest macierzą diagonalną, tj. wszystkie niezerowe wyrazy są na jej przekątnej). Podsumowując, model nie dostarczy danych na temat dokładnie przyjętej pozycji, co uznano za nadmiarowe, ale o odpowiedniku masy w ruchu obrotowym, tj. sumarycznym momencie bezwładności.

## ROZDZIAŁ IV

### WYNIKI WRAZ Z OMÓWIENIEM

#### 4.1. ETAP I – OPISANIE STRUKTURY KINEMATYCZNEJ FAZY LOTU W POJEDYNCZYM SALCIE „WILDCAT”

Pierwszym etapem zrozumienia wzorca ruchowego w technice sportowej jest opisanie fazowej struktury tego ruchu. Stąd opis fazy lotu (zapoczątkowanej podczas utraty kontaktu deski z podłożem) w triku snowboardowym nazywanym „wildcat” rozpoczęto od struktury fazowej korzystając z modelu statystycznego średniego. Pierwotnym założeniem opisu triku „wildcat” i jego modelowania było wykorzystanie modeli o masach skupionych: modelu punktowego – środka masy układu (COM) dla ruchu postępowego i modelu elipsoidy bezwładności ciała zbudowanej na osiach głównych dla ruchu obrotowego. **Zastosowano dwa sposoby obróbki danych.** Pierwszy polegał na uśrednieniu charakterystyk czasowych wielkości kinematycznych z analizowanych 45 salt. Wyliczono średnie wartości zmiennych w chwilach czasowych wybranych jako kryteria podziału lotu na fazy (opisanych w rozdziale 4.1.1.) i na ich podstawie zostały wyznaczone granice faz. Drugi to uzyskanie średnich wartości z poszczególnych 45 salt na granicach faz. Tym sposobem najpierw dla każdej próby zostały wyznaczone granice faz na podstawie kryteriów podziału lotu na fazy, po czym dane te zostały uśrednione.

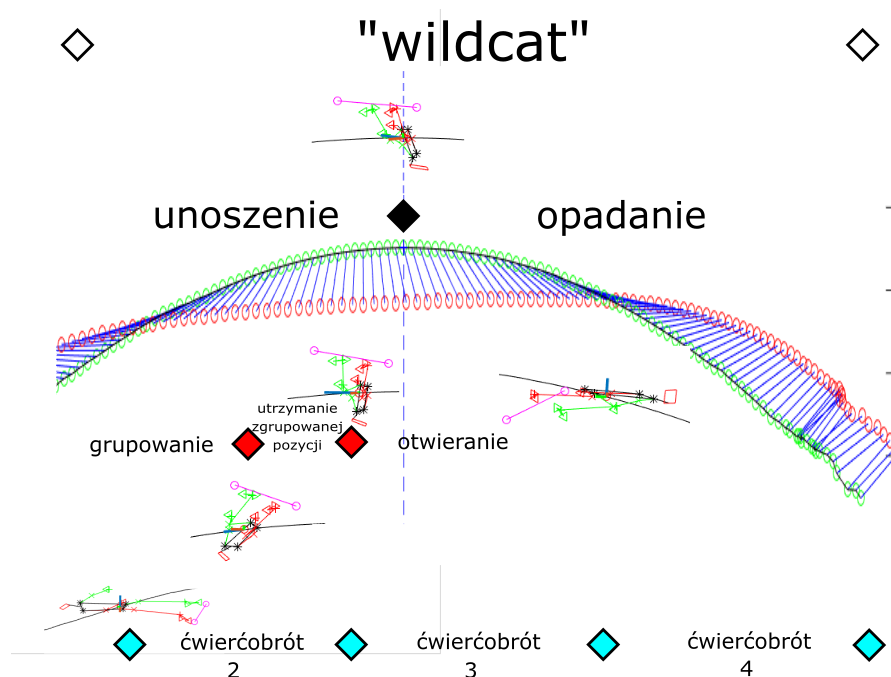
##### *4.1.1. FAZOWA STRUKTURA LOTU TRIKU „WILDCAT”*

Ze względu na złożoność ruchu w badanym triku zdecydowano się przyjąć równocześnie trzy kryteria podziału lotu na fazy. Wynika to z faktu, że w locie występują trzy rodzaje ruchu: ruch postępowy i obrotowy ciała (w globalnym układzie odniesienia) przy jednoczesnej zmianie pozycji poszczególnych części ciała (w lokalnym układzie odniesienia).

- ✓ Pierwsze kryterium wybrane ze względu na ruch postępowy w globalnym układzie odniesienia to **położenie środka masy układu (tj. ciało zawodnika + set snowboardowy) w osi pionowej – z\_COM2.** Jako granicę faz wybrano najwyższe położenie środka masy. W ten sposób lot został podzielony na unoszenie i opadanie (rys. 27).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

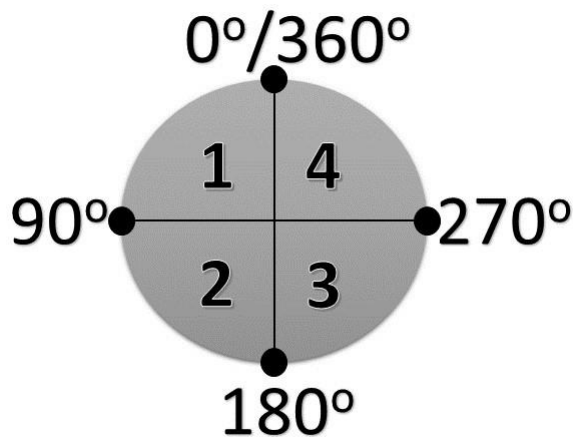
- ✓ Drugie kryterium wybrane ze względu na zmianę pozycji poszczególnych części ciała względem siebie to **pierwszy niezmiennik tensora bezwładności (tj. sumaryczny moment bezwładności ciała lub równoważnie sumaryczny moment bezwładności elipsoidy bezwładności) –  $I_{SUM}$** . Analizując ekstrema funkcji na podstawie tego kryterium wydzielono fazy: grupowania pozycji, utrzymania zgrupowanej pozycji i otwierania pozycji (rys. 27).
- ✓ Trzecie kryterium wybrane ze względu na ruch obrotowy ciała w globalnym układzie odniesienia to **położenie osi ciała zawodnika w płaszczyźnie lotu –  $\alpha_{OBR}$** . Oś ciała wyznaczono jako odcinek rozpoczynający się w środku masy układu (COM2) i kończący się w środku odcinka łączącego stawy ramienne. To kryterium pozwoliło na wyznaczenie kątów pomiędzy pionem a osią ciała w salcie. Przy pełnym obrocie wydzielono 4 ćwiartki po  $90^\circ$  (rys. 27). Ponieważ „wildcat” jest saltem w tył typu sideflip<sup>2</sup> ćwiartki obrotu osi ciała zostały numerowane przeciwnie do ruchu wskazówek zegara (rys. 28).



Rysunek 27. Schematyczny podział lotu na fazy w triku snowboardowym „wildcat”. Wskazano początek i koniec lotu (białe romby), granice faz ze względu na: wysokość COM2 (czarny romb), stopień zgrupowania pozycji (czerwone romby) i kąt obrotu osi ciała (niebieskie romby). Dodatkowo widoczna jest trajektoria COM2 (zielone kółeczka) oraz oś ciała (niebieski odcinek) stworzona pomiędzy COM2 i środkiem obręczy barkowej (czerwone kółeczka). Ponadto zamieszczono kinogramy odzwierciedlające pozycję ciała zawodnika na granicach faz.

<sup>2</sup> Salto bokiem.

- ROZPRAWA DOKTORSKA -

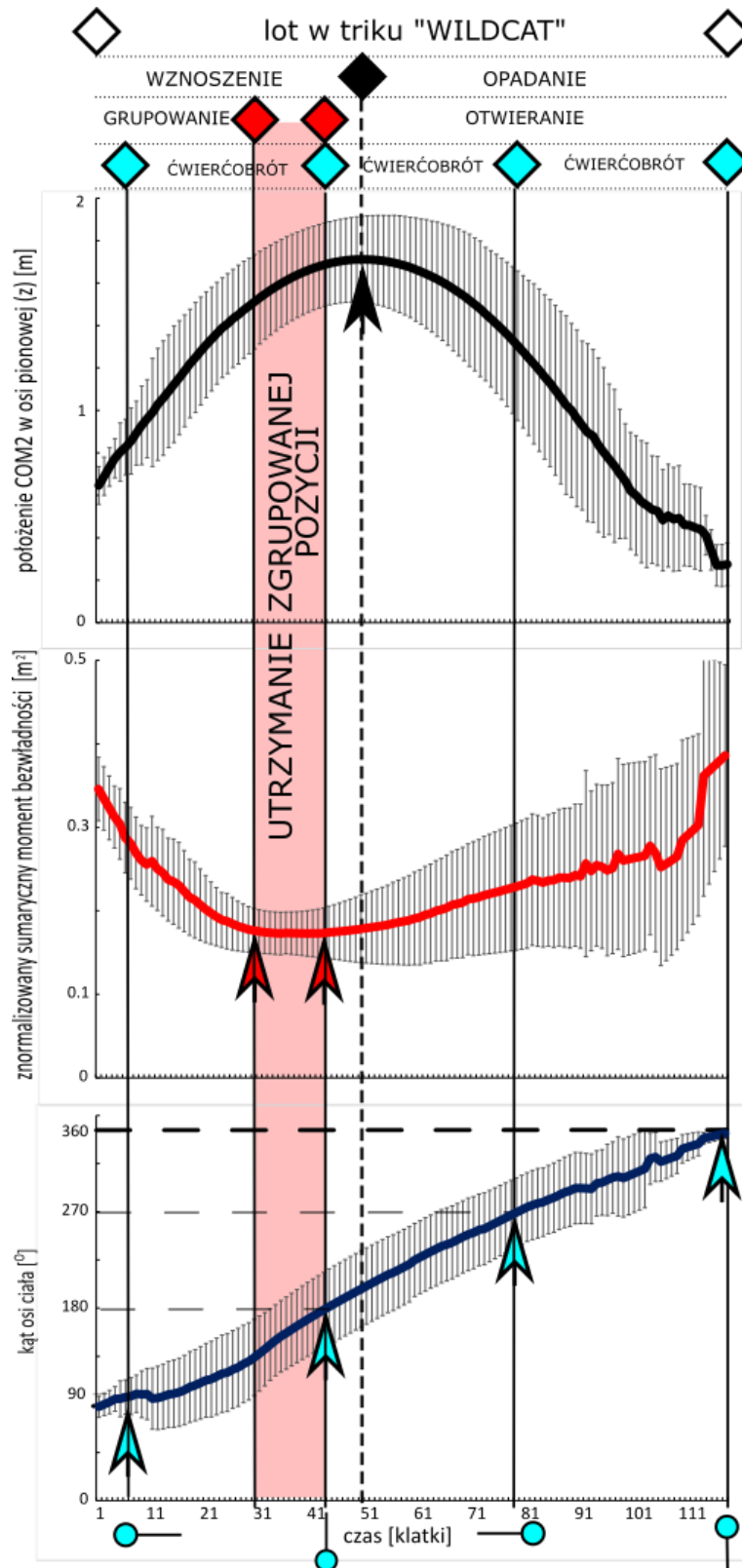


Rysunek 28. Numeracja „ćwiartek” obrotu w locie wyznaczonych na podstawie położenia osi ciała zawodnika względem pionu.

Uśredniony lot w triku „wildcat” trwał 1.16 s, dlatego na rysunku 27 przedstawiono jedynie pozycje na granicach faz. Ze względu na niewielką czytelność nieruchomego obrazu (przedstawiającego jedną płaszczyznę ruchu), który obrazuje strukturę fazową, zdecydowano się na inną formę graficzną - rysunek 29 przedstawia uśrednione przebiegi czasowe wszystkich zmiennych stanowiących kryteria ruchu.

- ✓ Pierwsze kryterium – **najwyższe położenie COM2 (maksymalna wartość  $z_{COM2}$ )** w uśrednionym przebiegu została osiągnięta w 50 klatce. Zgodnie z uzyskanymi średnimi wartościami prób faza unoszenia trwała  $0.43 \pm 0.09s$ .
- ✓ Drugie kryterium – **najbardziej zgrupowana pozycja ciała (minimalna wartość  $I_{sum}$ )** w uśrednionym przebiegu występowała w 30 klatce. Według średnich wartości prób faza grupowania trwała  $0.28 \pm 0.09s$ . Początek otwierania pozycji ciała nastąpił w 44 klatce, średnio po  $0.47 \pm 0.17s$  lotu. Zatem uwzględniając wszystkie wykonane salta czas fazy utrzymania zgrupowanej pozycji wynosił około 0.19s.
- ✓ Trzecie kryterium – **kąt osi ciała zawodnika podczas wykonywania obrotu (wartości  $\alpha_{OBR}$  na granicach „ćwiartek”)** dla średnich wartości prób wskazywał opuszczenie pierwszej ćwiartki obrotu (kąt  $90^\circ$  względem pionu) w czasie  $0.11 \pm 0.08s$  lotu, drugiej ( $180^\circ$ ) w  $0.37 \pm 0.11s$  a trzeciej ( $270^\circ$ ) w  $0.69 \pm 0.09s$ . Bardzo wczesne uzyskanie kąta  $90^\circ$  względem pionu było spowodowane nachyleniem progu rampy oraz przyjętą pozycją ciała w momencie rozpoczęcia lotu.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**



Rysunek 29. Fazowa struktura lotu w triku snowboardowym „wildcat” na podstawie uśrednionego przebiegu (wąsy wskazują odchylenie standardowe w poszczególnej chwili czasowej). Granice faz oznaczono rombami. Strzałki wskazują wartości poszczególnych kryteriów podziału ruchu, pokazując zakończenie/rozpoczęcie poszczególnych faz lotu.



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Uśrednione charakterystyki kinematyczne otrzymane z danych empirycznych potwierdziły nakładanie się początku fazy otwierania z pionowym ustawieniem osi ciała zawodnika ( $\alpha_{OBR}$  zbliżone do wartości  $180^\circ$ ). Co ciekawe takie zachowanie uważane jest za poprawne technicznie w ewolucjach akrobatycznych w skokach na trampolinie, potwierdzają to przepisy sędziowania, tj. prawidłowe wykonanie „otwarcia salta” (FIG 2017). Jednakże granice tych faz (początku otwierania pozycji i opuszczenia drugiej ćwiartki obrotu) nie pokrywają się z osiągnięciem najwyższego położenia COM2.

Analizując przebiegi czasowe struktury ruchu można odczytać charakterystyczne wielkości związane z przyjętym podziałem na fazy oraz opisać występujące kierunki ich zmian. Opis dotyczy średnich wartości uzyskanych przez badanych zawodników na granicach faz przy konkretnej geometrii rampy snowboardowej.

Lot rozpoczynał się przy położeniu COM2 na wysokości  $0.79 \pm 0.06\text{m}$  ( $z_{COM2}$ ) nad progiem rampy i około 1m przed progiem ( $y_{COM2} = -0.97 \pm 0.32\text{m}$ ). Kąt osi ciała przy rozpoczęciu lotu wynosił średnio aż  $87 \pm 10^\circ$  względem pionu ( $\alpha_{OBR}$ ). Zatem można stwierdzić, że już na początku lotu zawodnik ustawiał się w pozycji „na boku”, czyli głową w stronę najazdu. Wynikało to z nachylenia rampy oraz konieczności nadawania ciału momentu pędu do wykonania obrotu. Kończąc fazę lotu COM2 znajdował się w odległości  $5.29 \pm 1.11\text{m}$  ( $y_{COM2}$ ) od progu rampy. Lot nie był idealnie prostopadły do progu rampy, o czym świadczy boczne przemieszczenie COM2 wynoszące średnio  $0.34 \pm 0.15\text{m}$  ( $x_{COM2}$ ). Ponieważ nie było to duże przemieszczenie zostało ono pominięte w dalszych etapach modelowania. Na początku lotu wartość pionowej prędkości COM2 wynosiła  $4.34 \pm 0.30\text{m/s}$  ( $Vz_{COM2}$ ), poziomej  $5.27 \pm 0.31\text{m/s}$  ( $Vy_{COM2}$ ). Ze względu na rejestrowanie jedynie fazy lotu trudno jednoznacznie wskazać w którym momencie zawodnik rozpoczynał grupowanie pozycji ciała. Natomiast za każdym razem od początku lotu występowało zmniejszanie wartości sumarycznego momentu bezwładności ( $I_{SUM}$ ). Dla pozycji podczas zapoczątkowania lotu znormalizowany<sup>3</sup> sumaryczny moment bezwładności wynosił średnio  $0.32 \pm 0.08\text{kgm}^2/\text{kg}_{mc}$  (średni zawodniczy, tj. nieznormalizowany sumaryczny moment bezwładności wynosił  $22.42 \pm 5.77\text{kgm}^2$ ), po czym na końcu fazy grupowania wartość ta osiągała  $0.16 \pm 0.02\text{kgm}^2/\text{kg}_{mc}$  (średni zawodniczy  $11.60 \pm 3.25\text{kgm}^2$ ). Wobec tego wartość momentu bezwładności została zmniejszona o około 50%. W tym czasie COM2 znajdował się

---

<sup>3</sup> Normalizacja polegała na przyjęciu dla wszystkich zawodników masy ciała wraz z setem snowboardowym wynoszącej 1. W dalszej części pracy pominięto jednostkę  $\text{kg}/\text{kg}_{mc}$  z powodu znoszenia się jednostek masy.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

na wysokości  $1.59 \pm 0.22\text{m}$  ( $z_{\text{COM2}}$ ) w odległości  $1.38 \pm 0.88\text{m}$  za progiem ( $y_{\text{COM2}}$ ). Oznacza to, że podczas grupowania pozycji ciała zawodnik przemieszczał się około 0.8m w górę i około 2.4m do przodu. Średnia maksymalna wysokość COM2 wynosiła  $1.73 \pm 0.20\text{m}$  ( $z_{\text{COM2}}$ ), a była uzyskiwana średnio w odległości  $1.45 \pm 0.37\text{m}$  od progu rampy ( $y_{\text{COM2}}$ ). W momencie lądowania oś ciała zawodnika ustawiona była średnio pod kątem  $343 \pm 5^\circ$  względem pionu ( $\alpha_{\text{OBR}}$ ). Zatem podczas lotu w triku snowboardowym „wildcat” zawodnik obracał się o około  $256^\circ$ . Warto zauważyć, że nazewnictwo trików 360 (dla pojedynczych salt) czy 720 (dla salt podwójnych) nie mało pełnego odzwierciedlenia w faktycznie wykonywanym obrocie w fazie lotu.

Ponieważ badania dotyczyły jednej z możliwych geometrii rampy snowboardowej opis kinematyki lotu postanowiono pozostawić w tej (skondensowanej) formie.

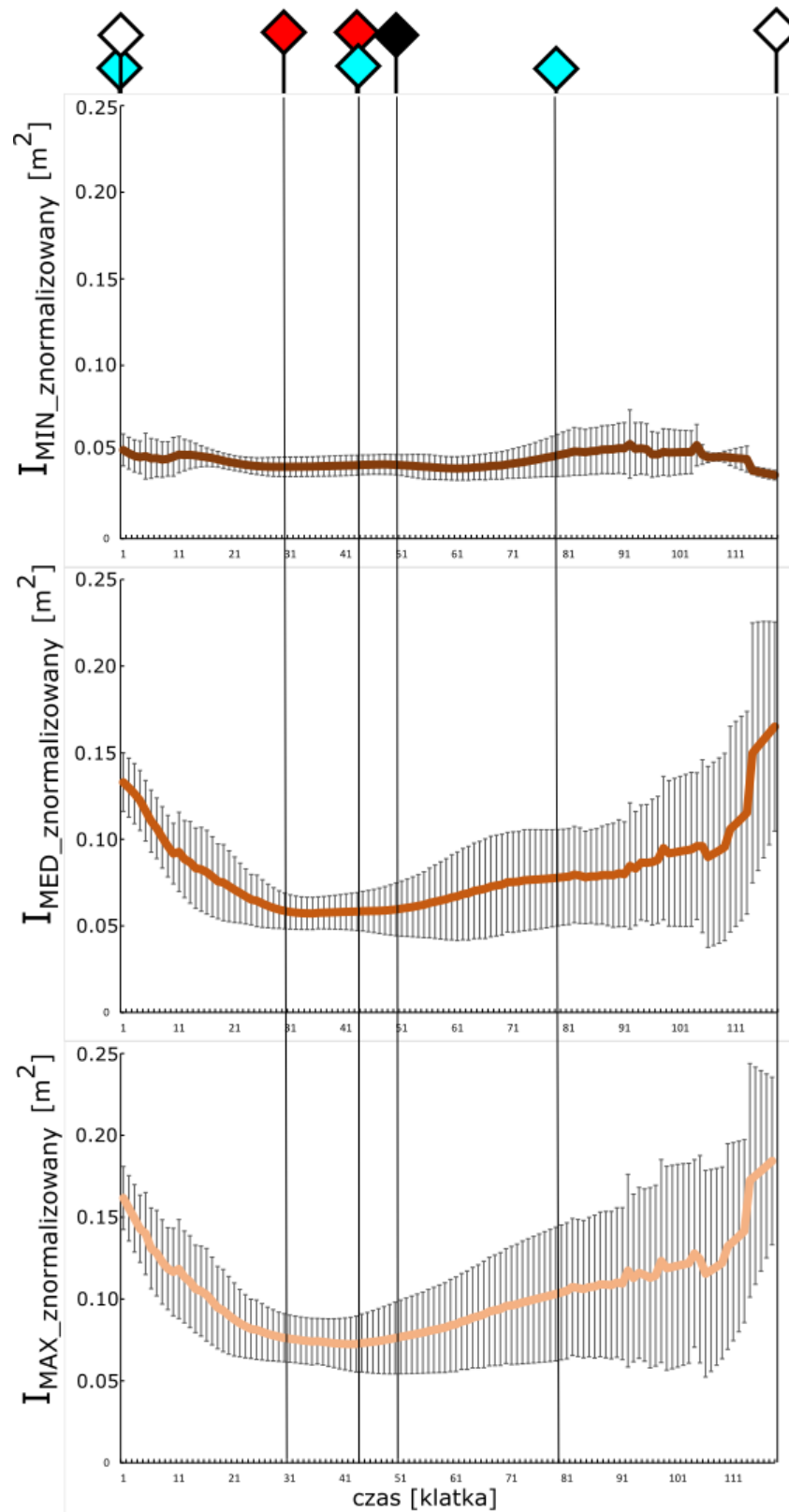
## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### 4.1.2. STRATEGIE WYKONANIA FAZY LOTU W SALCIE „WILDCAT”

O efekcie ruchu obrotowego w saltach w dużym stopniu decyduje moment pędu (kręt) nadany w trakcie fazy odbicia, którego wartość w locie pozostaje stała (zgodnie z zasadą zachowania momentu pędu). Zatem zmiany prędkości kątowej i momentu bezwładności ciała w tej fazie są od siebie zależne. Dlatego podczas analizy struktury fazowej lotu szczególną uwagę poświęcono momentowi bezwładności ciała, który zmienia się w wyniku przekształcenia pozycji (konfiguracji) ciała. Redukując (upraszczając) ciało do modelu elipsoidy bezwładności zbudowanej na osiach głównych zauważono interesujące zależności głównych momentów bezwładności (minimalnego –  $I_{MIN}$ , pośredniego –  $I_{MED}$  i maksymalnego –  $I_{MAX}$ ) względem osi głównych:

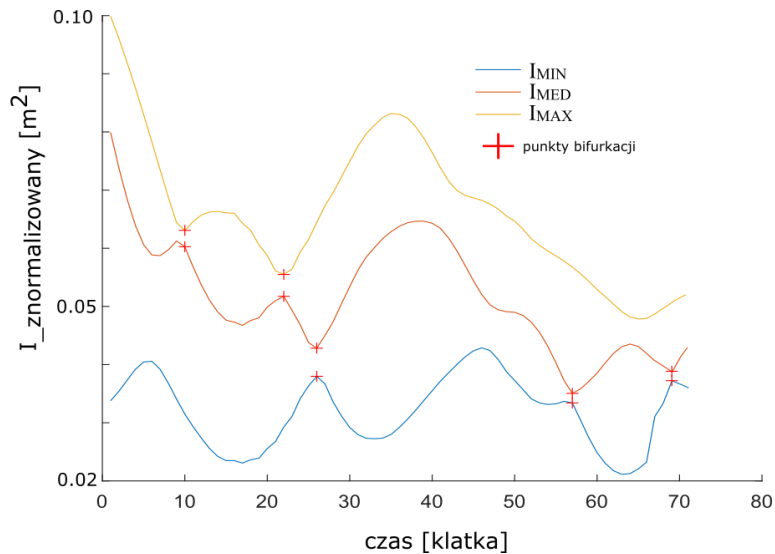
1. Wartości pośredniego ( $I_{MED}$ ) i maksymalnego ( $I_{MAX}$ ) momentu bezwładności są do siebie zbliżone (rys. 30). Dodatkowo w niektórych spośród 45 salt zauważono zjawisko bifurkacji. Polega ono na zamianie przyporządkowania osi głównych ze względu na zmianę wartości momentów bezwładności względem osi sąsiednich. Zjawisko to inaczej można opisać jako „przeskakiwanie” głównych momentów bezwładności pomiędzy poszczególnymi osiami głównymi (rys. 31).
2. Wartość najmniejszego momentu bezwładności ( $I_{MIN}$ ) w trakcie całego lotu nie ulega znaczącym zmianom. Oś względem której występuje najmniejszy moment bezwładności w postawie wyprostowanej odpowiada mniej więcej osi długiej ciała (jednak osie te nie pokrywają się idealnie). Natomiast pozostałe dwa momenty główne, tj. pośredni ( $I_{MED}$ ) i maksymalny ( $I_{MAX}$ ), maleją adekwatnie do zbliżania się poszczególnych części ciała do siebie (grupowania pozycji ciała) i rosną podczas oddalania się części ciała do siebie (otwierania pozycji ciała) (rys. 30).
3. Najbardziej interesujące okazało się występowanie dwóch wyraźnie różniących się od siebie charakterystyk czasowych sumarycznego momentu bezwładności ciała w poszczególnych saltach. Wyróżniono 27 prób w których występowało grupowanie pozycji ciała, wyraźne utrzymanie zgrupowanej pozycji odzwierciedlające się w utrzymaniu w miarę stałej wartości sumarycznego momentu bezwładności, po czym następowało otwieranie pozycji ciała. Natomiast jednoznacznie w 18 próbach natychmiast po fazie grupowania następowała faza otwierania (nie zaobserwowano utrzymania się zbliżonych wartości sumarycznego momentu bezwładności) (rys. 32).

- ROZPRAWA DOKTORSKA -



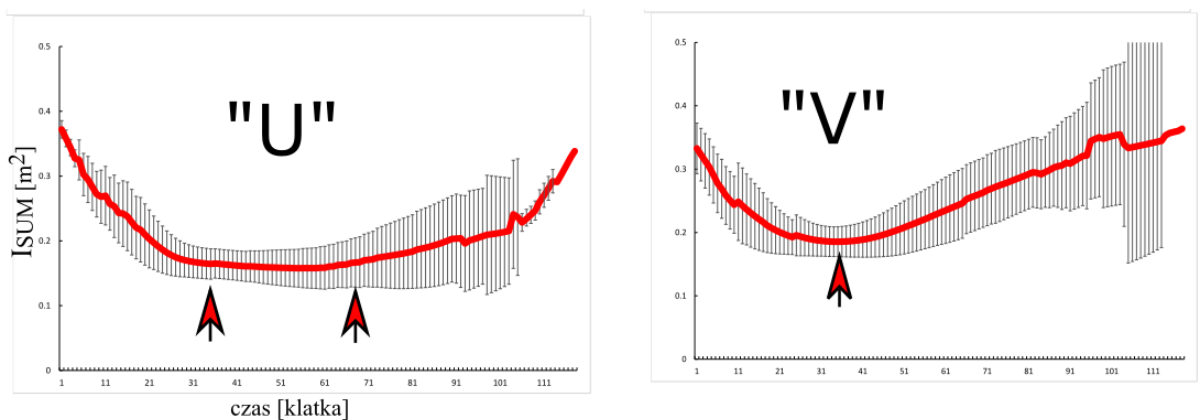
Rysunek 30. Uśredniona charakterystyka głównych znormalizowanych momentów bezwładności. Odchylenia standardowe zaznaczono w postaci „wąsów”.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -



Rysunek 31. Przykładowa charakterystyka czasowa głównych momentów bezwładności względem osi głównych uwzględniająca występowanie zjawiska bifurkacji.

Ostatnią zależność (z punktu nr 3) nazwano STRATEGIĄ WYKONANIA SALTA. Ze względu na kształt charakterystyki czasowej sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności nadano im odpowiednio nazwy jako „U” i „V” (rys. 32). Zgodnie z praktyką trenerską, w sportach w których wykonywane są wielokrotne obroty, utrzymanie zgrupowanej pozycji ciała w locie „pomaga” w wykonywaniu obrotów. Można to potwierdzić zasadami mechaniki klasycznej, gdzie przy stałej wartości krętu podczas lotu mniejszy moment bezwładności zwiększa prędkość kątową. Uznano, że zaobserwowane na tym etapie analizy zjawisko występowania dwóch strategii wykonania salta „wildcat” jest znaczące dla wykonania lotu. Zatem w dalszym opisie ruchu oraz w przygotowywaniu modelowania zostało wzięte pod uwagę.



Rysunek 32. Dwie charakterystyki czasowe sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności rozróżnione ze względu na swój kształt nazwane strategiami wykonania salta jako „U” i „V”.

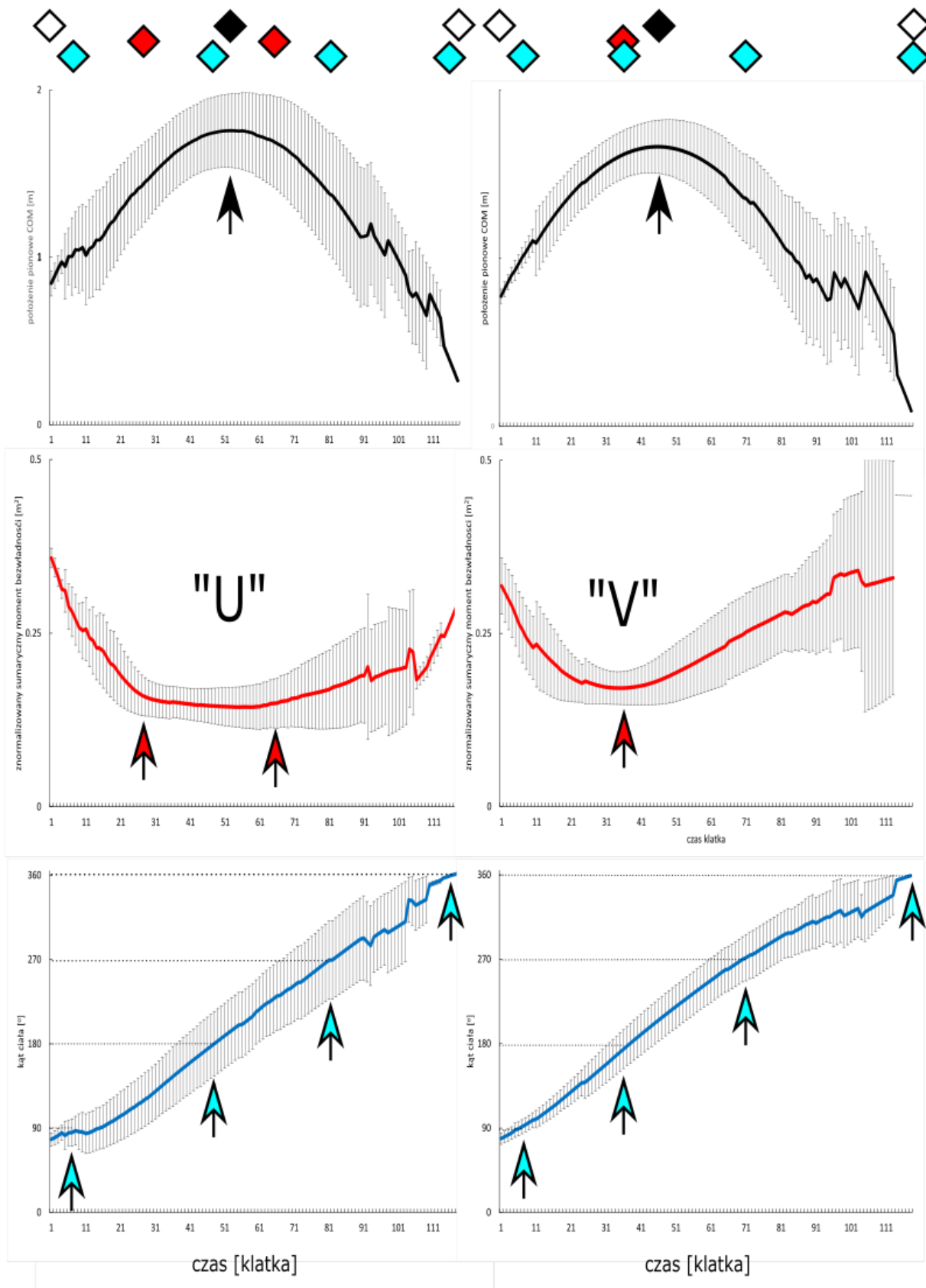
## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### 4.1.3. PORÓWNANIE STRATEGII „U” I „V” W SALCIE „WILDCAT”

Struktura kinematyczna uśrednionego przebiegu poszczególnych zmiennych wykazała widoczne różnice wykonania lotu w triku „wildcat” zgodnie ze strategiami „U” i „V” w przypadku znormalizowanego sumarycznego momentu bezwładności ( $I_{SUM}$ ) (rys. 33). W celu potwierdzenia istotności tego zjawiska dla średnich wartości z poszczególnych prób zastosowano test nieparametryczny Kołmogorowa-Smirnowa dla dwóch prób (tab. 5). Na tym etapie potwierdzono różnice niektórych cech (parametrów) świadczące o tym, że próbki pochodzą z różnych populacji.

Przesunięcie czasowe poszczególnych indywidualnych przebiegów spowodowało w kilku przypadkach odmienne proporcje wartości zmiennych. Ponadto należy pamiętać, że obie strategie wykonania salta miały inną strukturę fazową. Dlatego głównie skupiono się na analizie różnic związanych ze zmianami sumarycznego znormalizowanego momentu bezwładności ( $I_{SUM}$ ). W strategii „V” praktycznie nie występowała faza utrzymania zgrupowanej pozycji, gdyż jej średni czas wynosił  $0.09 \pm 0.05s$ , podczas gdy w strategii „U” faza ta trwała średnio  $0.38 \pm 0.12s$ . W stosunkowo krótkim ruchu jakim jest „wildcat” w strategii „U” czas utrzymania zgrupowanej pozycji ciała był ponad czterokrotnie dłuższy niż w strategii „V” (stąd powyższe stwierdzenie o braku tej fazy). Ponadto  $I_{SUM}$  w strategii „U” miał istotnie mniejszą wartość przez całą fazę grupowania niż w strategii „V” (czyli na końcu fazy grupowania, na końcu fazy unoszenia i na początku fazy otwierania) (tab. 5). Wszystkie wyniki przedstawiające istotne różnice zaznaczono na czerwono z przyjętym  $p < .05$ .

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**



Rysunek 33. Porównanie struktury faz lotu w przypadku dwóch strategii wykonania salta - „U” (27 salt) i „V” (18 salt) na podstawie uśrednionych przebiegów.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

*Tabela 5. Różnice średnich wartości zmiennych poszczególnych prób pomiędzy saltami wykonanymi strategią „U” i „V” na granicach faz lotu wykazane testem Kołmogorowa-Smirnowa. Pierwszy romb (biały) – początek lotu, drugi romb (czerwony) – koniec fazy grupowania, trzeci romb (czarny) – koniec fazy unoszenia, czwarty romb (czerwony) – koniec fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, piąty romb (biały) – koniec lotu.*

ZMIENNA	jedn.	p	średnia „U”	średnia „V”	SD „U”	SD „V”	n „U”	n „V”
z_COM2	[m]	<b>p &gt; .10</b>	0.81	0.72	0.26	0.30	27	18
y_COM2	[m]	<b>p &gt; .10</b>	-0.73	-0.74	0.51	0.64	27	18
I <sub>SUM</sub>	[m <sup>2</sup> ]	<b>p &gt; .10</b>	0.31	0.33	0.07	0.08	27	18
V <sub>z_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &lt; .05</b>	4.23	4.20	0.89	0.82	27	18
V <sub>y_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &lt; .05</b>	5.31	5.23	0.37	0.90	27	18
α <sub>OBR</sub>	[°]	<b>p &gt; .10</b>	71.39	85.94	20.90	19.75	27	18
z_COM2	[m]	<b>p &gt; .10</b>	1.58	1.61	0.26	0.18	27	18
y_COM2	[m]	<b>p &lt; .005</b>	1.67	0.99	0.97	0.54	27	18
I <sub>SUM</sub>	[m <sup>2</sup> ]	<b>p &lt; .005</b>	0.15	0.17	0.02	0.02	27	18
V <sub>z_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &lt; .005</b>	-0.31	0.95	1.93	0.81	27	18
V <sub>y_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &gt; .10</b>	5.04	5.19	0.39	0.39	27	18
α <sub>OBR</sub>	[°]	<b>p &lt; .005</b>	204.15	172.32	59.58	31.44	27	18
z_COM2	[m]	<b>p &gt; .10</b>	1.76	1.68	0.23	0.16	27	18
y_COM2	[m]	<b>p &lt; .025</b>	1.39	1.52	0.36	0.37	27	18
I <sub>SUM</sub>	[m <sup>2</sup> ]	<b>p &lt; .005</b>	0.16	0.19	0.02	0.03	27	18
V <sub>z_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &gt; .10</b>	-0.03	-0.05	0.04	0.03	27	18
V <sub>y_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &gt; .10</b>	5.06	5.13	0.40	0.37	27	18
α <sub>OBR</sub>	[°]	<b>p &lt; .025</b>	189.98	202.91	31.66	20.87	27	18
z_COM2	[m]	<b>p &gt; .10</b>	1.57	1.58	0.21	0.19	23	18
y_COM2	[m]	<b>p &lt; .025</b>	0.48	0.82	0.46	0.52	23	18
I <sub>SUM</sub>	[m <sup>2</sup> ]	<b>p &lt; .005</b>	0.16	0.17	0.02	0.02	23	18
V <sub>z_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &lt; .01</b>	-2.00	-1.27	0.72	0.70	23	18
V <sub>y_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &gt; .10</b>	5.19	5.21	0.35	0.39	23	18
α <sub>OBR</sub>	[°]	<b>p &lt; .05</b>	137.61	161.48	31.63	26.92	23	18
z_COM2	[m]	<b>p &gt; .10</b>	1.49	1.61	0.31	0.16	13	18
y_COM2	[m]	<b>p &lt; .005</b>	2.32	1.30	0.73	0.74	13	18
I <sub>SUM</sub>	[m <sup>2</sup> ]	<b>p &gt; .10</b>	0.16	0.18	0.03	0.01	13	18
V <sub>z_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &lt; .001</b>	-1.69	-0.37	1.03	1.2	13	18
V <sub>y_COM2</sub>	[m/s]	<b>p &gt; .10</b>	5.06	5.14	0.47	0.40	13	18
α <sub>OBR</sub>	[°]	<b>p &lt; .005</b>	243.21	189.85	30.85	44.04	13	18



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Analizując ruch obrotowy zawodnika oprócz  $I_{SUM}$  należy wskazać wpływający na wykonanie salta moment pędu nadany w trakcie fazy odbicia (wspomniany w rozdziale 4.1.2.). Porównanie momentów pędu zarejestrowane na początku lotu w obu strategiach wykazało istotne różnice (Test Kołmogorowa-Smirnowa,  $p < 0.001$ ). Średni wypadkowy kręt w strategii „U” wynosił  $17.98 \pm 4.31 \text{ m}^2/\text{s}$  natomiast w strategii „V”  $26.70 \pm 3.75 \text{ m}^2/\text{s}$ . Nie był to zaskakujący fakt. Mniejsze momenty bezwładności uzyskiwane w strategii „U” wraz z dłuższym czasem utrzymania zgrupowanej pozycji ciała pozwoliły uzyskać efektywny kąt obrotu ciała w triku „wildcat” nawet przy mniejszym momencie pędu, co jest zgodne z biomechanicznymi zasadami ruchu.

Jednakże nasuwa się pytanie: jak sterowany i regulowany jest trik snowboardowy „wildcat”? Czy zawodnik od początku steruje wartością momentu pędu nadawanego w fazie odbicia mając „zaplanowany” wzorzec całego ruchu? Czy wykorzystanie zmiany pozycji poszczególnych części ciała zgodne ze strategią wykonania lotu jest elementem regulacji ruchu? Czyli czy wybór strategii w trakcie lotu jest efektem zbyt małego (strategia „U”) czy zbyt dużego (strategia „V”) nadanego momentu pędu? Mimo, iż zagadnienia te wydają się interesujące, także ze względów szkolenia sportowego, wykraczają poza ramy niniejszej pracy. Dlatego prezentowana dysertacja nie da odpowiedzi na te pytania. Mogą być one jednak inspiracją do dalszych poszukiwań naukowych.

Pogłębiona analiza krętu zwróciła uwagę na jeszcze jeden fakt. Wypadkowy moment pędu nie pokrywał się z krętem względem osi x. W pozostałych osiach w globalnym układzie odniesienia<sup>4</sup> kręty nie były zerowe, jednak o rząd wielkości mniejsze niż względem osi x. Ponadto kręty względem osi x i z istotnie różniły się pomiędzy strategiami wykonania salta (tab. 6).

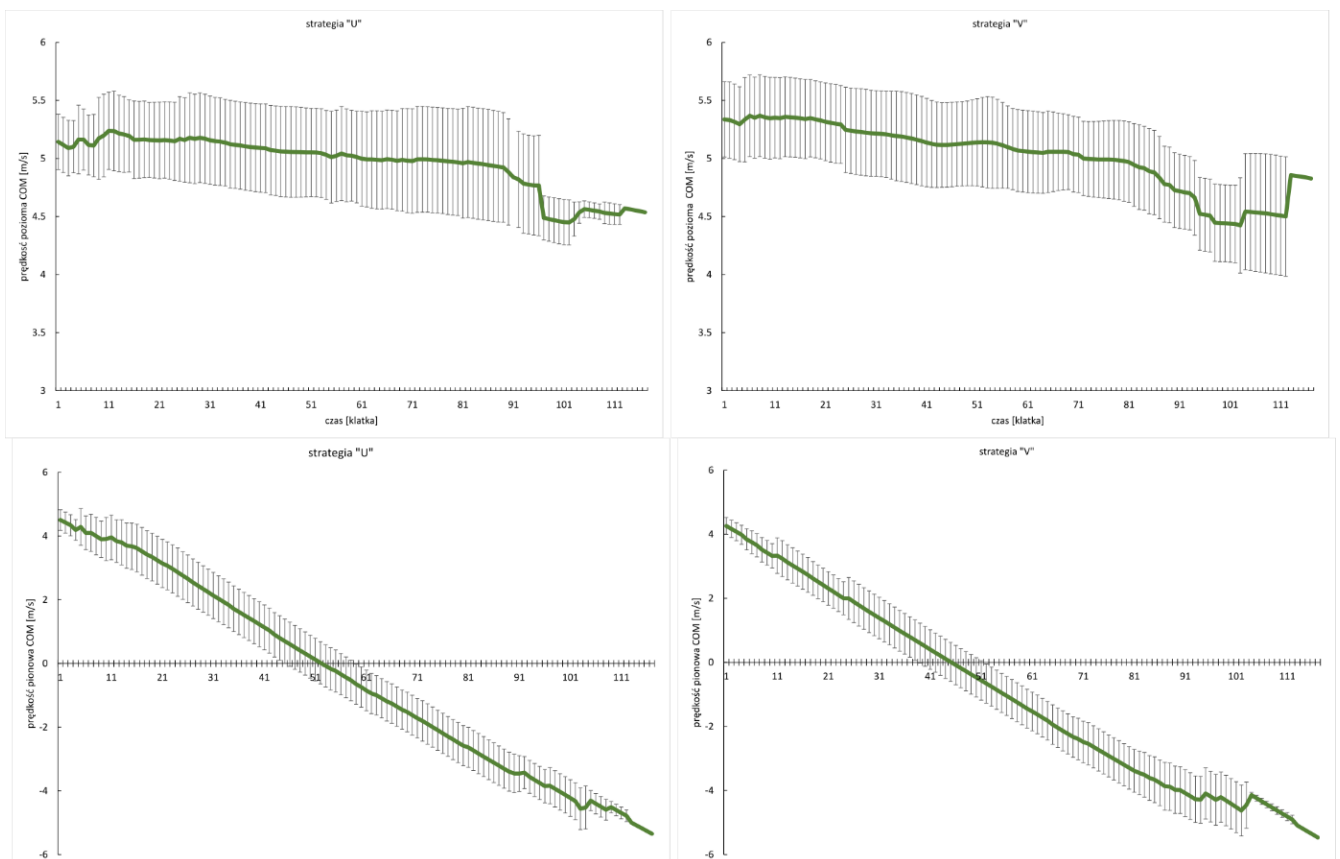
*Tabela 6. Różnice momentów pędu względem osi pomiędzy strategiami wykonania salta („U” i „V”).*

Kręt względem osi [m <sup>2</sup> /s]	<b>p</b>	średnia „U”	średnia „V”	SD „U”	SD „V”	N „U”	n „V”
x	<b>p &lt; .005</b>	15.65	23.67	4.96	4.42	27	18
y	<b>p &gt; .10</b>	0.66	0.33	6.28	6.40	27	18
z	<b>p &lt; .001</b>	-0.19	-7.55	5.99	7.40	27	18

<sup>4</sup> Orientacja osi: oś x (wyznaczona przez próg rampy) to oś pozioma i prostopadła do płaszczyzny lotu, oś y to oś pozioma w płaszczyźnie lotu, oś z to oś pionowa.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Różnica orientacji przestrzennej wektora krętu pomiędzy strategiami „U” i „V” wynosiła aż  $39^\circ$ . Różne wartości parametrów kinematycznych w wybranych chwilach czasowych uzyskiwanych podczas wykonania triku według strategii „U” i „V” skłoniły do porównania także charakterystyk czasowych poszczególnych zmiennych. Zdecydowano się na opisowe przedstawienie występujących odmienności (ponieważ celem pracy nie jest dokładne porównywanie obu strategii a sprawdzenie ich odmienności). Wyliczono uśrednione przebiegi zmiennych, które stanowią uzupełnienie informacji o wartościach zmiennych na granicach faz. Nieistotne różnice w przemieszczeniu COM2 w osi pionowej ( $z_{\text{COM2}}$ ) współistniały z istotnymi różnicami w przemieszczeniu w osi poziomej w płaszczyźnie lotu ( $y_{\text{COM2}}$ ) (tab. 6). Porównując trajektorie COM2 w obu strategiach nie było widać pomiędzy nimi różnic (rys. 33). Podobnie w przypadku charakterystyki czasowej prędkości w ruchu postępowym (rys. 34).

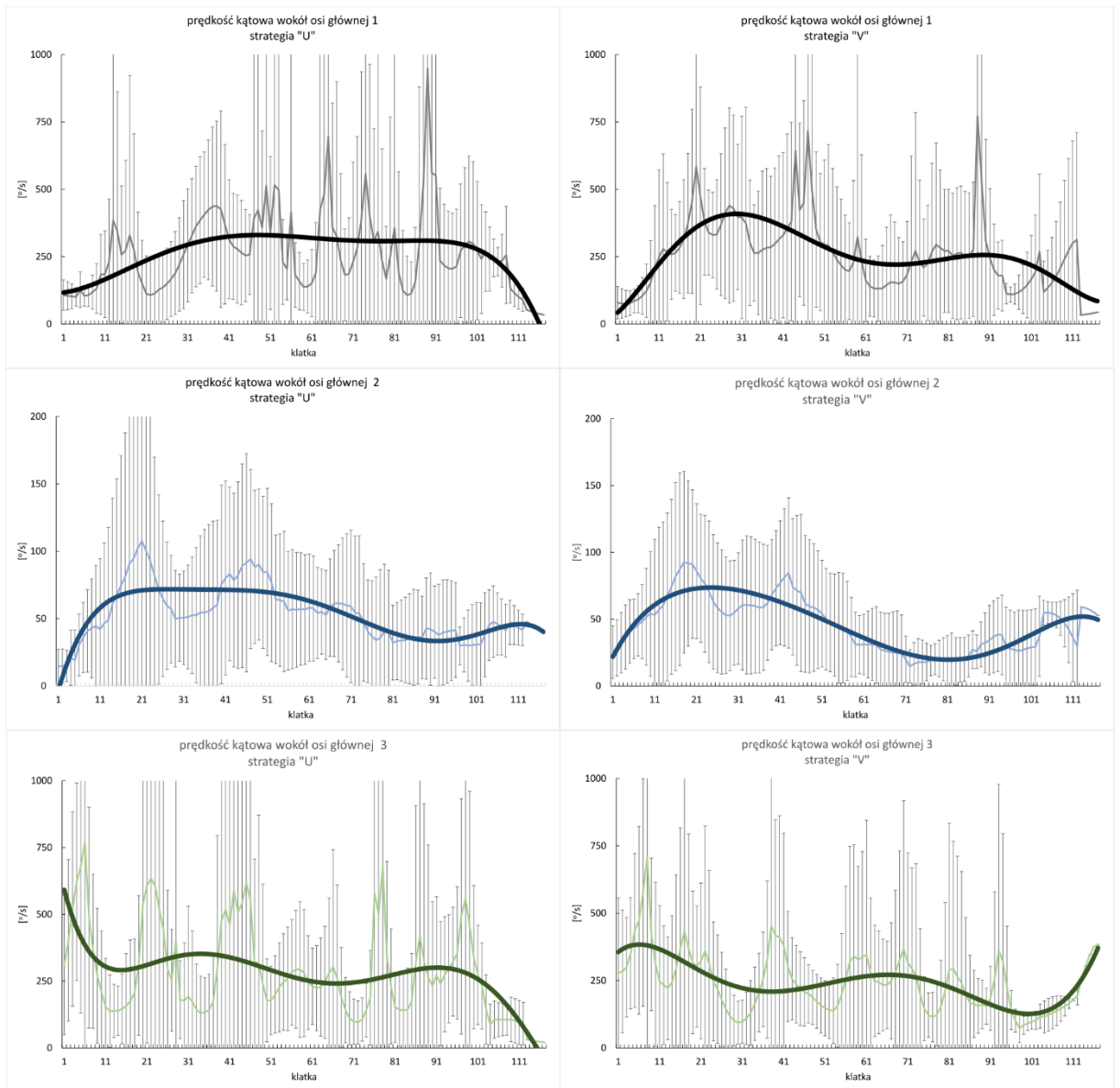


Rysunek 34. Prędkości COM2 w ruchu postępowym w osi pionowej ( $z$ ) oraz w osi poziomej w płaszczyźnie lotu ( $y$ ).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

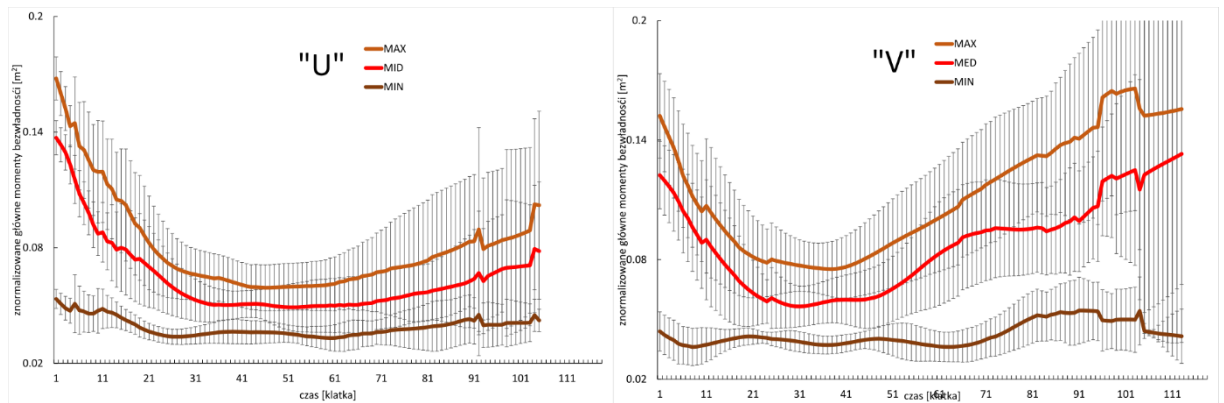
Przebiegi prędkości kątowej względem osi głównych dla modelu elipsoidy bezwładności użytego do opisu ruchu obrotowego przedstawiono na rysunku 35. Ich interpretacja nie była jednak trywialna, pamiętając że są to prędkości obrotu elipsoidy wokół osi głównych o różnych wartościach momentów bezwładności ( $1=I_{MAX}$ ,  $2=I_{MED}$ ,  $3=I_{MIN}$ ) (rys. 30). Dodatkowo obrót elipsoidy był wynikiem dwóch mechanizmów: obrotu ciała zawodnika oraz zmiany ukształtowania jego pozycji w locie. Ze względu na fazy, w których występuje zgrupowana pozycja ciała w locie, maksymalny i pośredni moment bezwładności względem osi głównych były zbliżone pod względem wartości (rys. 36). Spadek ich wartości na początku lotu dowodził grupowaniu pozycji ciała. Natomiast minimalny (najmniejszy) moment bezwładności występował względem osi głównej zbliżonej do osi długiej ciała i pozostawał prawie stały przez cały lot. Układ fizyczny charakteryzują także energie. Charakterystyki czasowe zarówno energii potencjalnej i kinetycznej dla ruchu postępowego oraz kinetycznej dla ruchu obrotowego wykazały znaczne podobieństwo (rys. 37). Zagadnienie dokładnego porównania struktury kinematycznej fazy lotu w strategii „U” i „V” jest interesujące, jednakże wymaga dalszych studiów wykraczających poza planowany obszar rozprawy.

- ROZPRAWA DOKTORSKA -

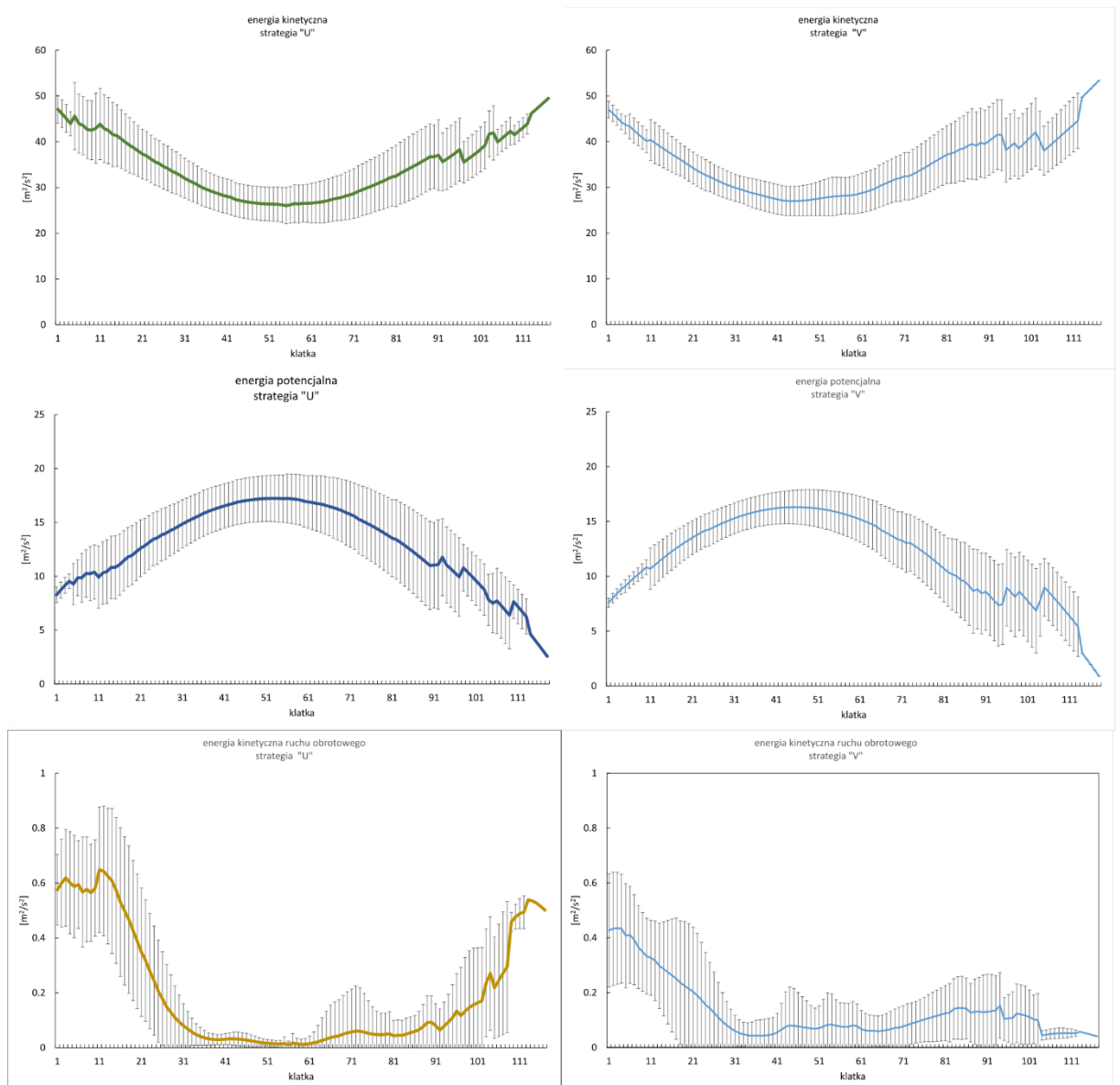


Rysunek 35. Prędkości obrotowe elipsoidy bezwładności wokół osi głównych w strategii „U” i „V”. Oś 1 to oś względem której występował maksymalny moment bezwładności ( $I_{MAX}$ ), oś 2 – pośredni ( $I_{MED}$ ), oś 3 – minimalny ( $I_{MIN}$ ). Cienka linia przedstawia uśrednioną charakterystykę czasową prędkości a gruba charakterystykę wygładzoną wielomianem 6 stopnia.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**



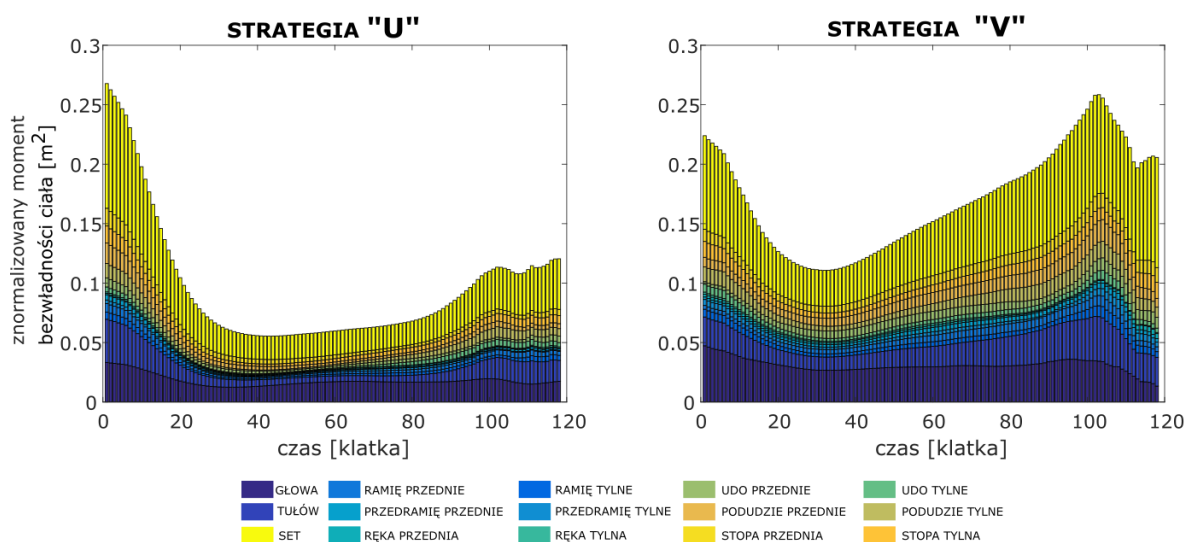
Rysunek 36. Główne momenty bezwładności względem osi głównych podczas triku „wildcat” wykonywanego zgodnie ze strategiami „U” i „V”.



Rysunek 37. Uśrednione przebiegi energii (kinetycznej, potencjalnej, kinetycznej ruchu obrotowego) w strategii „U” i „V”.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Kolejnym etapem było porównanie udziału momentów bezwładności poszczególnych części ciała na moment sumaryczny (na podstawie uśrednionego przebiegu). Tym razem nie uśredniano sumy momentów bezwładności względem osi głównych (modelu elipsoidy bezwładności) lecz sumę momentów bezwładności poszczególnych elementów układu (części ciała i setu snowboardowego) względem jego środka masy. Stąd nieco mniejsze wartości przy zachowaniu charakterystyki czasowej. Analiza wskazała, że największą komponentę w sumarycznym momencie bezwładności miały kończyny dolne i set snowboardowy (rys. 38). Taką zależność można wyjaśnić wartością proporcji mas i odległości tych mas od COM2. Set snowboardowy o przyjętej masie był najbardziej oddalony od COM2 przy „otwartej” pozycji ciała. Drugim członem dającym duży wkład w wartość sumarycznego momentu bezwładności był tułów z głową – stanowią bowiem prawie 50% masy ciała zawodnika.

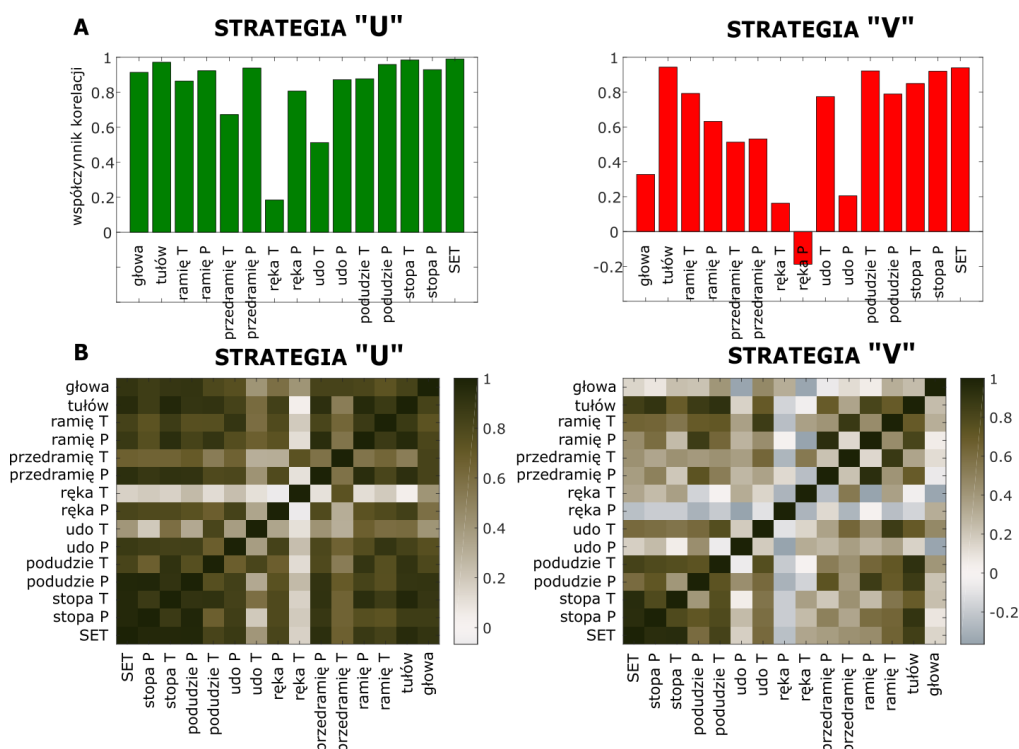


Rysunek 38. Wkład poszczególnych elementów układu ciała zawodnik + set snowboardowy w wartość sumarycznego momentu bezwładności dla strategii „U” (po lewej) i strategii „V” (po prawej).

Jednocześnie na rysunku 38 można zauważyć, że w strategii „U” wkład poszczególnych członów układu wydaje się bardziej proporcjonalny w trakcie całego lotu. To „wrażenie” potwierdza analiza korelacji przebiegów momentów bezwładności poszczególnych segmentów układu (rys. 39). W strategii „U” przebiegi momentów bezwładności większości członów wykazały silną korelację z sumarycznym momentem bezwładności, gdzie w przypadku strategii „V” związki te były słabsze (przednia ręka wykazała nawet korelację ujemną) (rys. 39a). Można stwierdzić, iż w strategii „V” ruch poszczególnych części układu był bardziej chaotyczny. Potwierdza to także analiza korelacji przebiegów momentów bezwładności

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

poszczególnych członów względem siebie (rys. 39b). W strategii „U” przebiegi momentów bezwładności większości części układu wysoko ze sobą korelowały, co oznacza, że grupowaniu pozycji towarzyszyło wspólne zbliżanie części ciała do COM2 a otwieraniu pozycji ich oddalanie. Ze względu na różne typy pozycji snowboardzistów<sup>5</sup> biorących udział w badaniach, lateralizacja części ciała została nazwana zgodnie z przyjętą w snowboardzie nomenklaturą jako kończyny wiodące, tj. przednie (P) i kończyny tylne (T) (FIS 2019).



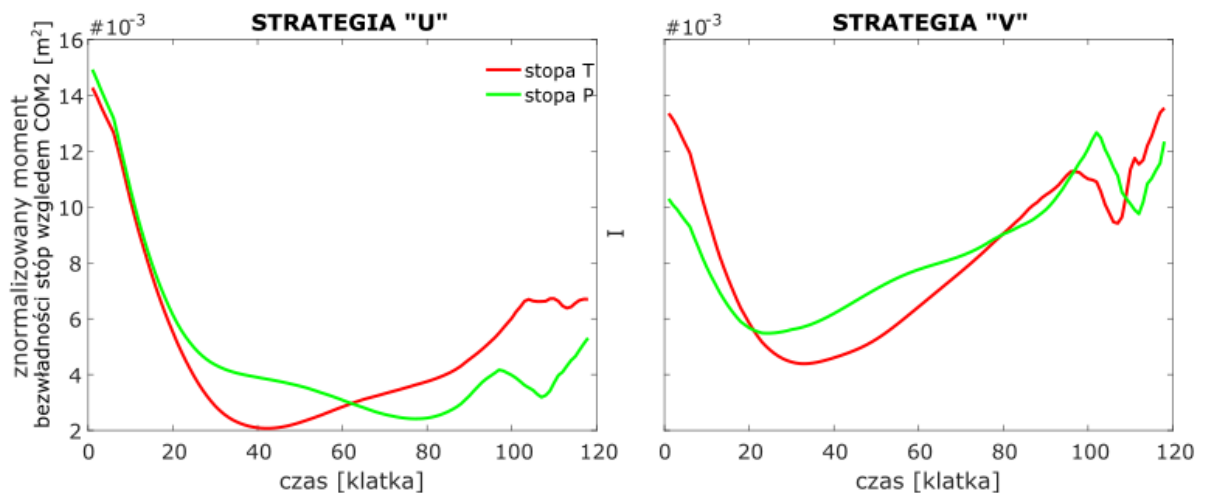
Rysunek 39. Korelacje momentów bezwładności poszczególnych członów układu względem sumarycznego momentu bezwładności (część A) oraz wzajemnie względem siebie (część B). W części B im ciemniejsze pole tym większa korelacja przebiegów momentów bezwładności. Dla strategii „V” występowały także korelacje ujemne.

Koncentrując uwagę na zachowaniu kończyn dolnych (ze względu na największy wpływ na wartość sumarycznego momentu bezwładności) zauważono jeszcze jedną interesującą prawidłowość. Charakterystyka czasowa momentu bezwładności wywoływana przez poszczególne stopy w locie była odmienna w strategii „U” i „V” (rys. 40). Uśredniony przebieg w obu strategiach wykazał przesunięcie fazowe w „grupowaniu” i „otwieraniu” stóp. Jako „grupowanie” stóp należy w tym przypadku rozumieć, analogicznie jak dla całej pozycji, ich zbliżanie do środka masy układu (w tym przypadku moment bezwładności malał) i odpowiednio „otwieranie” oznacza oddalanie (moment bezwładności wzrastał).

<sup>5</sup> Typy pozycji występujące u snowboardzistów – Regular lub Goofy (rozdział 1.1.2.).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Jednak opisane przesunięcie fazowe ma inny obraz. W przypadku strategii „U” pierwsza do COM2 przybliżała się tylna stopa a przednia podążała za nią z pewnym opóźnieniem. Kiedy tylna stopa zaczynała się oddalać, przednia „grupowała się” przyjmując pozycję w analogicznej odległości od COM2 jak tylna stopa. W ten sposób sumaryczny moment bezwładności obu stóp utrzymywał się na stałym poziomie. Natomiast w strategii „V” przednia stopa w trakcie całego lotu była dalej od COM2 niż tylna stopa. To sprawiło, że jej moment bezwładności był proporcjonalnie większy. Także przednia stopa zaczynała się wcześniej „otwierać”. Stąd sumaryczny moment bezwładności obu stóp osiągał jedno minimum. Być może ten sposób przemieszczenia stóp odpowiadał za charakterystykę poszczególnych strategii grupowania pozycji ciała i utrzymania zgrupowanej pozycji w locie w triku „wildcat”. Jednak zaobserwowane zjawisko na stosunkowo niewielkiej próbie wymaga dalszego badania i potwierdzenia.



Rysunek 40. Przebiegi momentów bezwładności stóp (T – tylna, P - przednia) względem środka masy układu w locie podczas triku „wildcat”. Po stronie lewej strategia „U”, po prawej stronie „V”.

Ponieważ celem niniejszej pracy jest modelowanie warunków wykonania saltu w bardziej ogólnej skali, opisany powyżej wątek nie będzie kontynuowany w dysertacji. Niemniej można na tym etapie zaryzykować stwierdzenie, że strategia „U” powinna być rekomendowana (w szczególności w saltach o obrotach wielokrotnych).



#### 4.2. ETAP II – IDENTYFIKACJA ZMIENNOŚCI RUCHÓW W FAZIE LOTU W POJEDYNCZYM SALCIE „WILDCAT”

Zmienność ruchów człowieka można opisać jako normalne zmiany występujące w strukturze ruchu przy powtarzaniu tego samego zadania motorycznego. Jest ona naturalną i ważną cechą ruchu (Stergiou, Harbourne, Cavanaugh 2006). Przed rozpoczęciem tworzenia modelu sprawdzono wewnątrz- i zewnątrz- osobniczą zmienność w analizowanym ruchu, gdyż może ona wpływać na stosowalność oraz jakość predykcji modelu. Niezależnie od tego w jaki sposób zmienność zostanie oceniona to wiadomo, że mniejsza zmienność wskazuje na skuteczniejsze wykonywanie zadania ruchowego w kontekście realizacji jego wzorca.

Szczegółowe omówienie poziomu zmienności zostało zawarte w artykule „Movement Variability During the Flight Phase in a Single Back Sideflip (Wildcat) in Snowboarding” (Bacik et al. 2020), którego jestem współautorką i został dołączony w aneksie pracy.

W celu określenia poziomu zmienności w pojedynczym saltie „wildcat” wykorzystano: położenie pionowe ( $z\_COM2$ ) i poziome w kierunku lotu ( $y\_COM2$ ) środka masy układu ciał, składową pionową ( $Vz\_COM2$ ) i składową poziomą kierunku lotu ( $Vy\_COM2$ ) prędkości chwilowej środka masy układu ciał, kąt osi ciała względem pionu ( $\alpha_{OBR}$ ) oraz sumaryczny moment bezwładności elipsoidy bezwładności ( $I_{SUM}$ ). Wartości wskazanych zmiennych występowały w chwilach czasowych na granicach faz (według wcześniej przyjętych kryteriów podziału lotu na fazy), tj. na początku lotu, na końcu fazy grupowania pozycji, podczas maksymalnego położenia pionowego COM2, na początku fazy otwierania pozycji. Dodatkowo wyliczono 10 zmiennych będących wskaźnikami opisującymi zmiany parametrów w trakcie poszczególnych faz, tj. zmiana położenia COM2 w osi pionowej oraz w osi poziomej w płaszczyźnie lotu od momentu uzyskania najwyższego położenia COM2 do momentu uzyskania maksymalnego zgrupowania pozycji ciała, zmiana sumarycznego momentu bezwładności w trakcie fazy grupowania pozycji, szybkość zmiany sumarycznego momentu bezwładności w trakcie fazy grupowania pozycji (iloraz zmiany  $I_{SUM}$  i czasu trwania fazy), zmiana kąta osi ciała zawodnika względem pionu od momentu uzyskania najwyższego położenia COM2 do momentu maksymalnego zgrupowania pozycji ciała oraz od momentu uzyskania maksymalnego zgrupowania pozycji ciała do momentu rozpoczęcia otwierania pozycji ciała, czas fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, zmiana czasu od momentu uzyskania najwyższego położenia COM2 do momentu uzyskania maksymalnego zgrupowania pozycji ciała oraz od momentu uzyskania najwyższego położenia COM2 do momentu kiedy zawodnik

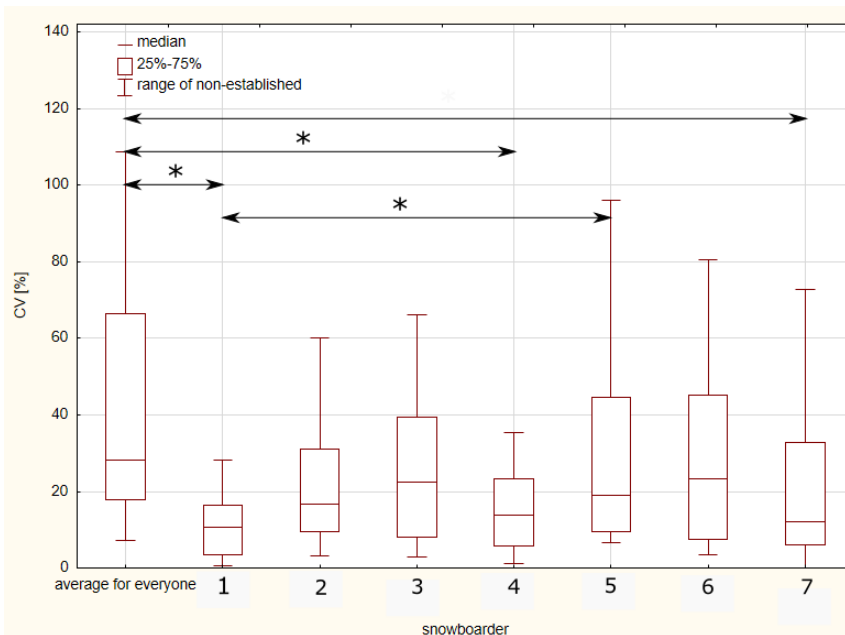
## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

znajdował się w położeniu „głową w dół” (kąąt osi ciała był zbliżony do wartości 180°) oraz od momentu uzyskania maksymalnego zgrupowania pozycji ciała do momentu kiedy zawodnik znajdował się w położeniu „głową w dół” (kąąt osi ciała był zbliżony do wartości 180°).

Analiza zmienności została przeprowadzona ze względu na:

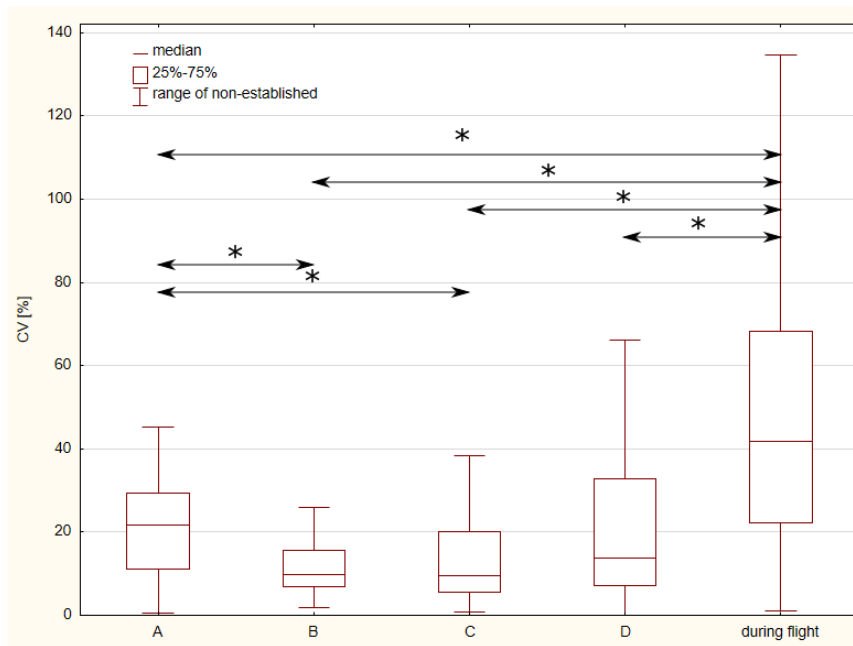
- o badanego – dotycząca poszczególnych zawodników (od „1” do „7”) oraz średniej całej grupy („average for everyone”) (rys. 41),
- o moment realizacji ruchu – związana z granicami faz („A” – początek lotu, „B” – koniec grupowania pozycji ciała, „C” – maksymalne położenie pionowe COM2, „D” – początek otwierania pozycji ciała) oraz w całej fazie lotu („during flight”) (rys. 42)
- o typ zmiennej – w odniesieniu do położenia i przemieszczeń w ruchu postępowym („linear”), prędkości w ruchu postępowym („speeds”), położenia i przemieszczeń w ruchu obrotowym („angular”), czasu trwania poszczególnych faz („times”), wartości i ich zmian dotyczących sumarycznego momentu bezwładności („moments of inertia”) (rys. 43).

Zdecydowano się na analizę stosowanego w literaturze klasycznego współczynnika zmienności (CV), który został wyliczony jako moduł ilorazu odchylenia standardowego i średniej arytmetycznej analizowanej zmiennej.

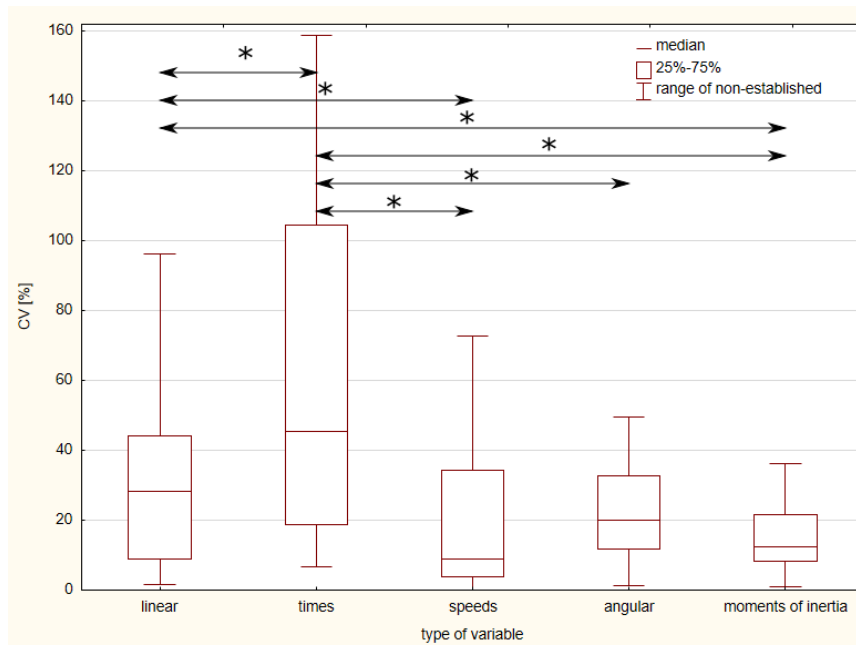


Rysunek 41. Współczynnik zmienności dla wszystkich parametrów pomiędzy badanymi oraz zmiennością dla całej grupy (istotne różnice na poziomie  $p < 0.05$  oznaczono „\*”) (Bacik et al. 2020).

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**



Rysunek 42. Współczynnik zmienności parametrów kinematycznych lotu na granicach faz oraz w poszczególnych fazach (istotne różnice na poziomie  $p < 0.05$  oznaczono „\*”) (Bacik et al. 2020).



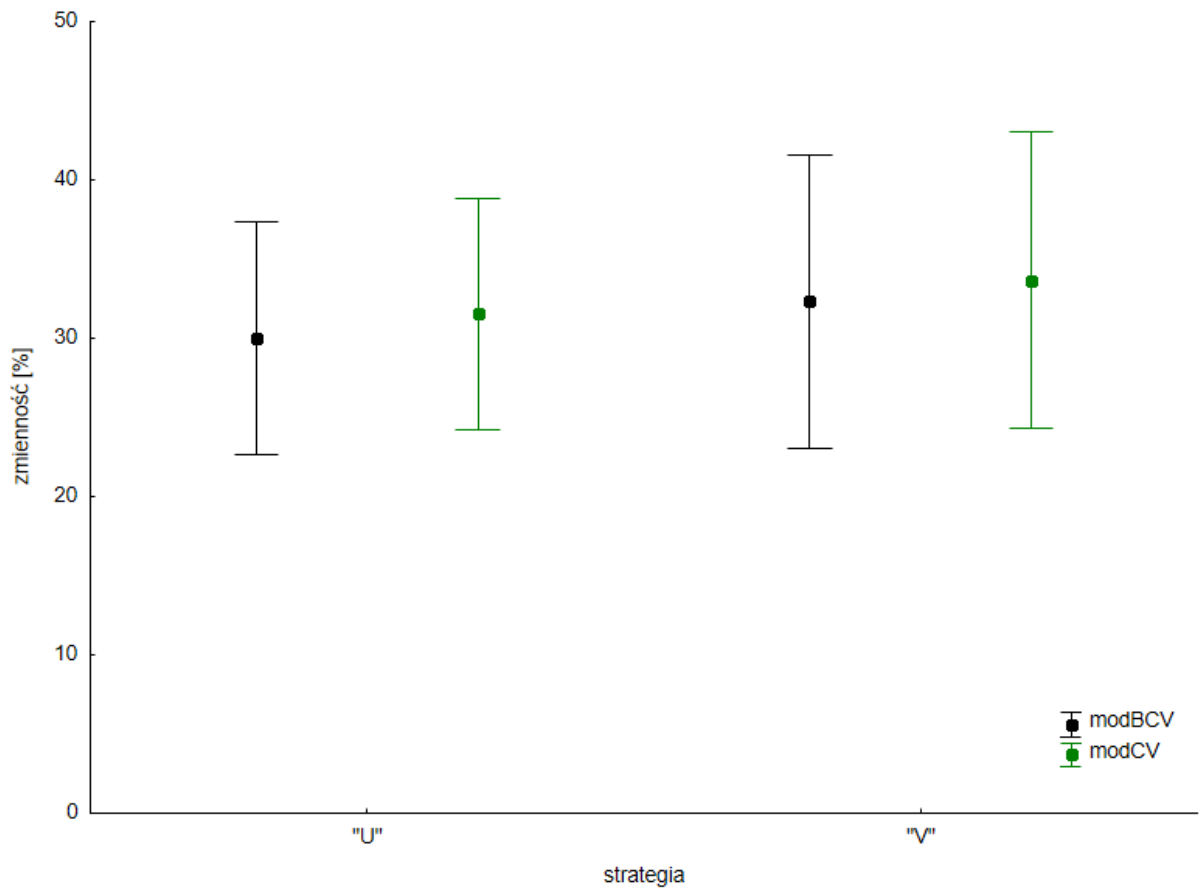
Rysunek 43. Współczynnik zmienności parametrów kinematycznych lotu z podziałem na typ zmiennej (istotne różnice na poziomie  $p < 0.05$  oznaczono „\*”) (Bacik et al. 2020).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Wyniki wskazują, że z uwagi na badanego zmienność w 45 saltach wykonanych przez 7 zawodników średnio osiągała wartość 28% (rys. 41, patrz: „average for everyone”). Najmniejszy współczynnik zmienności dla poszczególnych zawodników wynosił 11% (rys. 41, patrz: „snowboarder 1”), największy 23% (rys. 41, patrz: „snowboarder 6”). Można zauważyć, że te wartości były zbliżone do zmienności w innych badaniach sportów śnieżnych, gdzie CV wynosił około 30% (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2009; McAlpine et al. 2012; Nedergaard et al. 2015). Natomiast ze względu na moment realizacji ruchu, najbardziej stabilny lot dotyczył chwili czasowej najwyższego położenia COM2, tj. 10% (rys. 42, patrz: „C”), najmniej stabilny był początek lotu, tj. 22% (rys. 42, patrz: „A”). W przypadku parametrów pogrupowanych zgodnie z ich typem, najbardziej powtarzalne są te dotyczące prędkości w ruchu postępowym, tj. 9% (rys. 43, patrz: „speeds type of variable”) oraz związane z sumarycznym momentem bezwładności, tj. 12% (rys. 43, patrz: „moments of inertia”).

Natomiast podczas dokonywania opisu fazowej struktury ruchu w saltie „wildcat” zauważono dwie strategie wykonania lotu (strategie „U” i „V”), które wskazano w artykule, ale nie zidentyfikowano poziomu zmienności ruchu w tym obszarze. Zdecydowano się na uzupełnienie tej zależności w kontekście opisu powtarzalności, co może mieć wpływ na dalsze etapy modelowania. Z uwagi na niewielką liczbę publikacji podejmujących tematykę biomechaniki ruchu w sportach śnieżnych oraz chęć podjęcia dyskusji z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy zdecydowano się na analizę klasycznego współczynnika zmienności. Jednakże oceniając zachowanie układu biologicznego, bardziej adekwatne wydaje się zastosowanie biologicznego współczynnika zmienności (BCV), który wylicza się jako moduł różnicy klasycznego współczynnika zmienności i błędu standardowego średniej (Bradshaw 2007). Dlatego podczas analizy zmienności uwzględniającej strategię wykonania ruchu („U” i „V”) zastosowano obie miary rozproszenia (rys. 44). Ich wartości były zbliżone do 30% (podobnie jak we wcześniej uzyskanych wynikach (Bacik et al. 2020) oraz w odniesieniu do badań sportów śnieżnych (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2009; McAlpine et al. 2012; Nedergaard et al. 2015), co wskazuje na przedział „przeciętnej zmienności”. Statystyka testowa (test Kołmogorowa-Smirnowa) nie wykazała istotnych różnic w poziomie zmienności pomiędzy strategiami wykonania saltu „wildcat” (przy przyjętym poziomie istotności różnic  $p < 0.05$ ).

- ROZPRAWA DOKTORSKA -

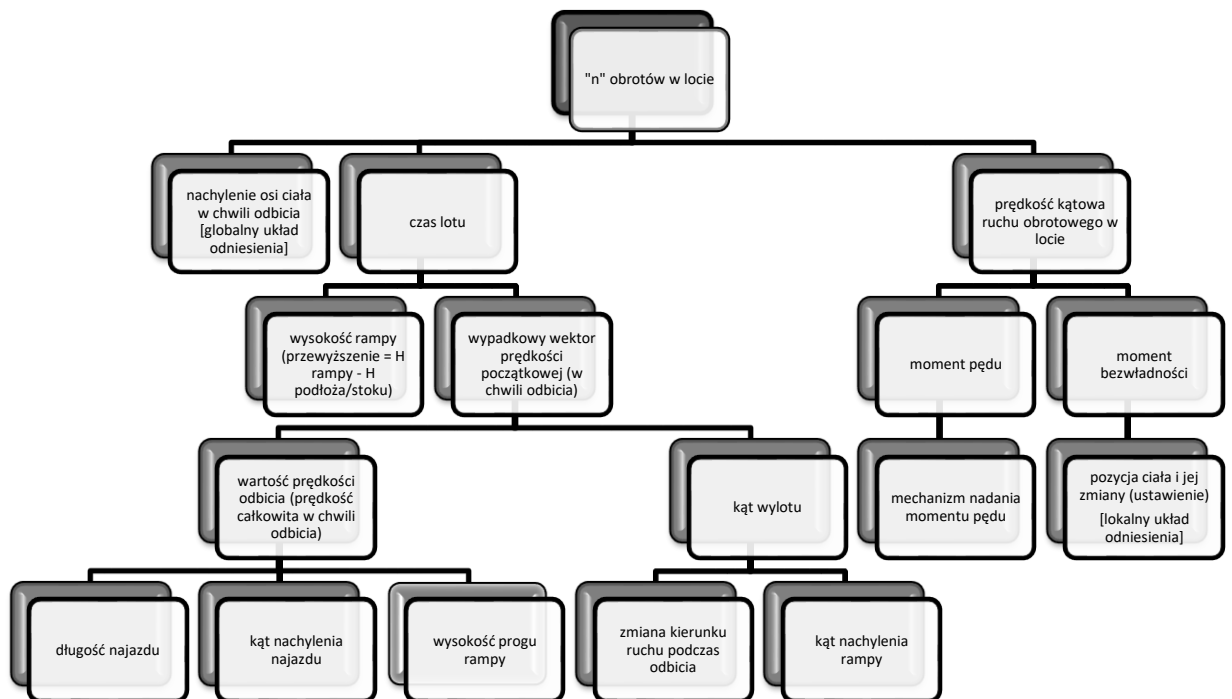


Rysunek 44. Poziomy zmienności w strategiach "U" i "V" zobrażowane współczynnikami zmienności – klasycznym (modCV) i biologicznym (modBCV). Punkty oznaczają medianę, natomiast „wąsy” wskazują wartości min - maks.

### 4.3. ETAP III – OPRACOWANIE MODELU FAZY LOTU POJEDYNCZEGO SALTA „WILDCAT” PRZY UŻYCIU MODELU PUNKTOWEGO I MODELU ELIPSOIDY BEZWŁADNOŚCI CIAŁA Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNOŚCI RUCHÓW I WARUNKÓW POCZĄTKOWYCH

#### 4.3.1 MODEL DETERMINISTYCZNY SALTA SNOWBOARDOWEGO

Po poznaniu prezentowanego ruchu zidentyfikowano zmienne wpływające na uzyskany rezultat końcowy. W efekcie powstał deterministyczny model lotu w saltie „wildcat” (rys. 45). Jako cel ruchu przyjęto ilość obrotów wykonanych w fazie lotu. Następnie hierarchicznie wybrano poszczególne zmienne wpływające na zadany rezultat, uwarunkowane zależnościami fizycznymi.



Rysunek 45. Model deterministyczny salta snowboardowego.

Ze względu na złożoność analizowanego ruchu w modelu deterministycznym zostały uwzględnione wielkości fizyczne opisujące i wpływające zarówno na ruch postępowy i obrotowy. Dlatego przygotowując model predykcyjny skorzystano z modelu punktowego COM2 oraz modelu elipsoidy bezwładności zbudowanej na osiach głównych.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Model punktowy pozwolił na wyliczenie parametrów kinematycznych ruchu postępowego zawodnika w trakcie lotu zgodnie z opisem fizycznym rzutu ukośnego. Nie dawał jednak wystarczającej informacji dla modelowania wykonywanych obrotów, stanowiących cel ruchu. W związku z tym zdecydowano się dodatkowo wykorzystać model elipsoidy bezwładności. Dzięki jego zastosowaniu można było obliczać parametry kinematyczne w ruchu obrotowym.

### 4.3.2 PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA MODELU

1. Ruch jest modelowany na podstawie uśrednionych przebiegów zarejestrowanych salt.
2. Salta wykonywane są w jednej płaszczyźnie (płaszczyzna yz).
3. Nie uwzględnia się oporów powietrza.
4. Ruch postępowy snowboardzisty modelowany jest jako ruch punktu materialnego (środek masy układu zawodnik + set snowboardowy – COM2) zgodnie z rzutem ukośnym na podstawie wartości empirycznych na początku lotu.
5. Na podstawie wypadkowej prędkości COM2 zostają wyznaczone: trajektoria ruchu w postaci paraboli oraz czas lotu.
6. Podczas lądowania COM2 zawodnika znajduje się na poziomie równym jego wysokości w chwili rozpoczęcia lotu.
7. Decyzją eksperta (osoby tworzącej model) wyznaczone są granice faz grupowania i utrzymania zgrupowanej pozycji na podstawie czasowych przebiegów uśrednionego sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności, jego pochodnej oraz prędkości kątowej osi ciała<sup>6</sup>.
8. Czas trwania faz grupowania i utrzymania zgrupowanej pozycji z danych pomiarowych zostaje uzyskany po ich wyznaczeniu, natomiast czas otwierania pozycji ciała w salcie stanowi dopełnienie czasu całej fazy lotu modelowanej z rzutu ukośnego.
9. Moment pędu to wartość średnia uzyskana z uśrednionego przebiegu krętu wokół osi x (osi poziomej prostopadłej do płaszczyzny ruchu).
10. Zgodnie z zasadą zachowania momentu pędu jego wartość w locie pozostaje stała.
11. Zmiany prędkości kątowej wynikają ze zmian sumarycznego głównego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności.
12. Kąt osi ciała modelowany jest na podstawie średnich prędkości kątowych w poszczególnych fazach (wyznaczonych wcześniej, tj. grupowanie, utrzymanie i otwieranie pozycji ciała w salcie).

---

<sup>6</sup> Oś ciała zawodnika została wyznaczona poprzez odcinek łączący środek masy układu (COM2) ze środkiem odcinka łączącego osie obrotów stawów ramiennych.



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

13. Zmienne stanowiące wielkości brzegowe (początkowe modelu): wartość wypadkowego wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu, kąt wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu (w stosunku do poziomu), kąt osi ciała zawodnika na początku fazy lotu (w stosunku do pionu), czas trwania fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, moment pędu zawodnika nadany w trakcie fazy odbicia.
14. Modelowanie ruchu może przebiegać na podstawie zmiany kombinacji więcej niż jednej wielkości brzegowej.
15. Zmianie nie podlega faza grupowania pozycji, która zawsze zostaje wyznaczona z danych pomiarowych (czas trwania fazy oraz wartość zmiany sumarycznego głównego momentu bezwładności w tej fazie).
16. Wartość momentu pędu wprost proporcjonalnie wpływa na wartość prędkości kątowej.
17. Czas trwania fazy utrzymania zgrupowanej pozycji wpływa na czas trwania następnej fazy (otwierania pozycji), przez co również na wartości prędkości kątowych w tych fazach.
18. Dzięki zaimportowanej bazie empirycznych danych model posiada zabezpieczenie w postaci braku dokonania wyliczeń po wprowadzeniu nierealnych wartości brzegowych zmiennych (odległych od prawdopodobnie występujących w tym ruchu).

### 4.3.3 MODELOWANIE W STWORZONEJ APLIKACJI

Na potrzeby modelowania stworzono nakładkę GUI na skrypty w środowisku Matlab, którego elementy przedstawiono na rysunku 46 i opisano poniżej.

1. Import danych empirycznych dla wybranych salt z jednego z możliwych źródeł:
  - 1) wyznaczenie danych wejściowych z plików systemu optoelektronicznego (Motion Capture System) zapisanych w formacie .c3d:
    - a) wyznaczenie faz grupowania oraz utrzymania zgrupowanej pozycji na podstawie charakterystyk czasowych uśrednionego sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności, jego narastania oraz prędkości kątowej osi ciała;
  - 2) wczytanie danych wejściowych przygotowanych wcześniej z wyznaczenia danych w postaci pliku zapisanego w formacie .xlsm:
    - a) wyznaczone wcześniej fazy grupowania oraz utrzymania zgrupowanej pozycji zostały zapamiętane, jednakże można wyznaczyć je ponownie;

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

- 3) wczytanie danych wejściowych przygotowanych wcześniej z systemu video (po przetworzeniu w środowisku Matlab) w postaci pliku zapisanego w formacie .csv.
2. Dane wynikowe z importowanych salt:
    - 1) w oknach wynikowych ukazują się wartości średnie i odchylenia standardowe z uśrednionych przebiegów parametrów wejściowych, stanowiące początkowy zestaw wartości zmiennych brzegowych:
      - a) wartość wypadkowego wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu, kąt wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu (w stosunku do poziomu), kąt osi ciała zawodnika na początku fazy lotu (w stosunku do pionu), kąt osi ciała zawodnika na końcu fazy lotu (w stosunku do pionu), moment pędu zawodnika nadany w trakcie fazy odbicia;
      - b) czasy trwania poszczególnych faz lotu (grupowania pozycji ciała, utrzymania zgrupowanej pozycji ciała, otwierania pozycji ciała) z uśrednionego przebiegu zaimportowanych empirycznych danych (na podstawie ich wcześniejszego wyznaczenia).
  3. Modelowanie kąta osi ciała na końcu fazy lotu (kąta lądowania) dla ustalonego (wprowadzonego) zestawu zmiennych brzegowych:
    - 1) możliwość modelowania ruchu za pomocą wartości zadanych zmiennych: wartość wypadkowego wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu, kąt wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu (w stosunku do poziomu), kąt osi ciała zawodnika na początku fazy lotu (w stosunku do pionu), czas trwania fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, moment pędu zawodnika nadany w trakcie fazy odbicia;
    - 2) ustalenie wymaganej wartości kąta osi ciała zawodnika na końcu fazy lotu na podstawie modelu statystycznego średniego, statystycznego optymalnego lub założeń odpowiadających założeniom „bezpiecznego lądowania”;
    - 3) uzyskanie informacji o wartości kąta osi ciała zawodnika zamodelowanego ruchu i ilości wykonanych obrotów wraz z weryfikacją spełnienia warunków „bezpiecznego lądowania”;
    - 4) wybór wyświetlania animacji przemieszczania się osi ciała zawodnika w płaszczyźnie yz.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

4. Modelowanie kąta osi ciała na końcu fazy lotu (kąta lądowania) dla zbioru zmiennych brzegowych:
  - 1) graficzne przedstawienie wyników modelowania dwóch dowolnie wybranych zmiennych modelu (z pięciu dostępnych) o określonych zakresach wartości wraz z informacją o ilości wykonanych obrotów;
    - a) możliwość wskazania zakresu optymalnego kąta lądowania, który zostaje wyświetlony w prezentowanych na wykresie wynikach jako obszar w białym kolorze;
    - b) wybór zapisywanego formatu wykresu (.jpg, .png, .bmp, .tiff);
  - 2) wyliczenie niepewności modelu<sup>7</sup> wyrażonej w „%”.

Wyznaczenie końca fazy grupowania pozycji oraz początku fazy otwierania pozycji przedstawia rysunek 47. Rysunek 48 to wykres przykładowych rozwiązań po modelowaniu dwóch wybranych zmiennych we wskazanych zakresach wartości. Biały obszar widoczny na wykresie oznacza zbiór rozwiązań zawierających się w granicy przyjętego zakresu lądowania (uznanego za poprawny).

---

<sup>7</sup> Moduł różnicy wartości kąta osi ciała w momencie lądowania wyliczonego z importowanych danych empirycznych i kąta osi ciała w momencie lądowania wyliczonego z modelu podzielone przez kąt osi ciała w momencie lądowania wyliczonego z danych empirycznych.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

The screenshot shows a MATLAB GUI window titled 'model\_salta\_10082020'. The interface is divided into three main sections:

- Top Bar:** Contains four buttons: **1.2)** Wczytaj dane wejściowe, **1.1)** Wyznacz dane wejściowe, **1.3)** Wczytaj film, and **1.2)a)** Wyznacz fazy ponownie.
- Wczytane dane:** A table for entering data.
 

	Srednie:	Std:
<b>2.1)a)</b> V (T0):	7.34	0.54
Kąt wektora prędkości (T0):	44.33	2.27
Kąt osi ciała (T0):	77.95	6.86
Kąt osi ciała (Tend):	354.02	2.43
Moment pędu:	0.28	0.1

**2.1)b)** Wyznaczone na podstawie faz:

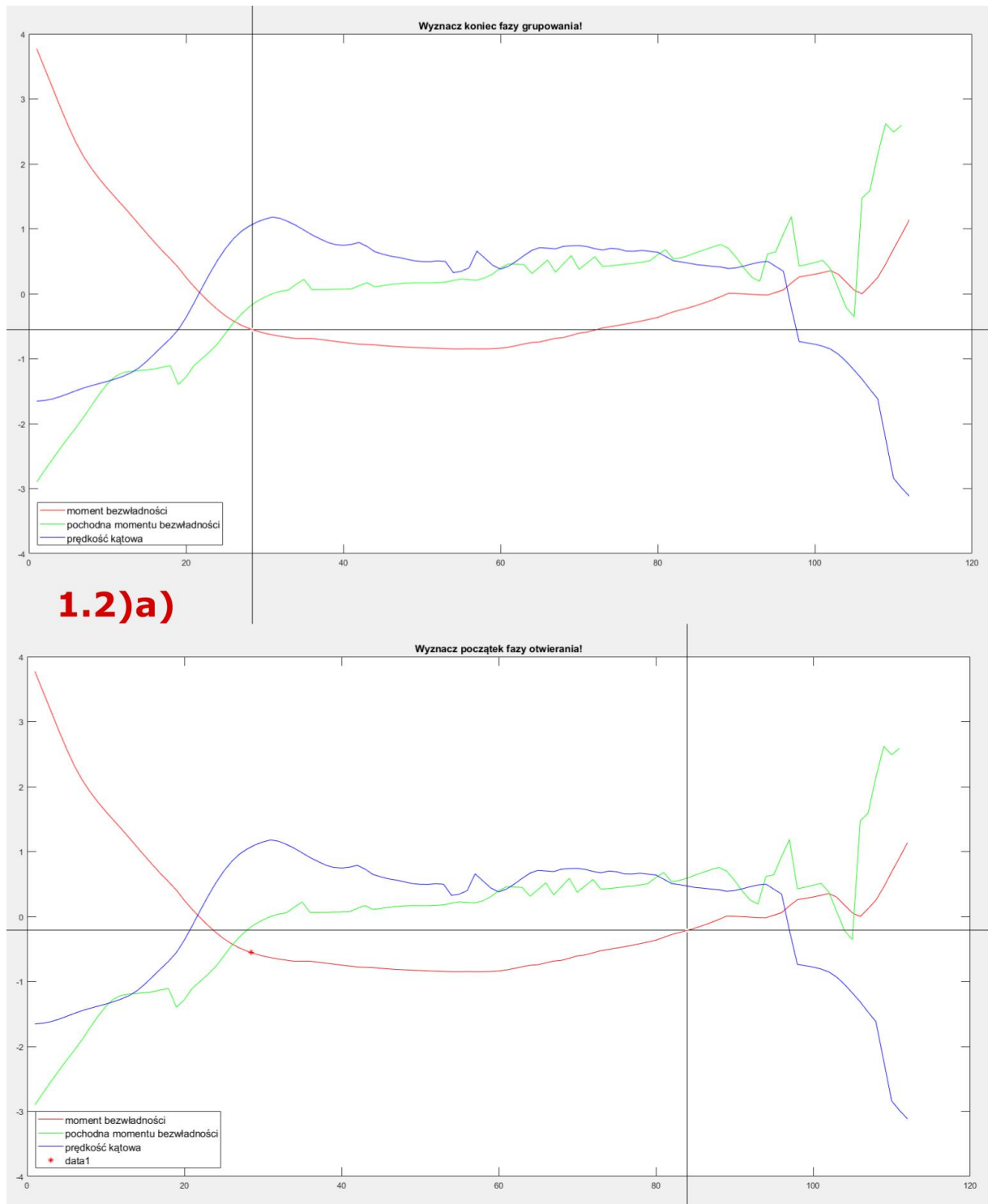
T grupowania:	0.3
T utrzymania:	0.42
T otwierania:	
Omega F1:	241.35
Omega F2:	291.62
Omega F3:	
- Modelowanie:** A section for defining model parameters.
 

<b>3.1)</b> V (T0):	7.34	Kąt wektora prędkości (T0):	44.33	Kąt osi ciała (T0):	77.95
T utrzymania:	0.42	Moment pędu:	0.28	<b>3.2)</b> Wymagany kąt osi ciała (Tend):	340
Rozdzielczość:	0.001	Liczba obrotów:	<b>3.3)</b>	Kąt osi ciała (Tend):	
<b>3.4)</b> Animować?	<input checked="" type="radio"/> Tak				
- Wykres:** A section for generating plots.
 

V (T0):	7.34	Kąt wektora prędkości (T0):	44.33	<b>4.2)</b> Kąt osi ciała (T0):	77.95	T utrzymania:	0.42	Moment pędu:	0.28
Zmienna 1:	V (T0)	<b>4.1)</b> Zmienna 2:	Kąt osi ciała (T0)						
od:	6.34	do:	8.34	od:	72.95	do:	82.95		
Krok:	0.01	Kąt lądowania:		Rozdzielczość:	0.001				
Ilość obrotów:	1	Optymalne lądowanie:		<b>4.1)a)</b> od:		do:		<b>4.3)</b> Niepewność modelu [%]:	

Rysunek 46. Elementy nakładki GUI do modelowania przedstawione w oknie stworzonej aplikacji w środowisku MATLAB. Poszczególne numery odpowiadają opisowi aplikacji.

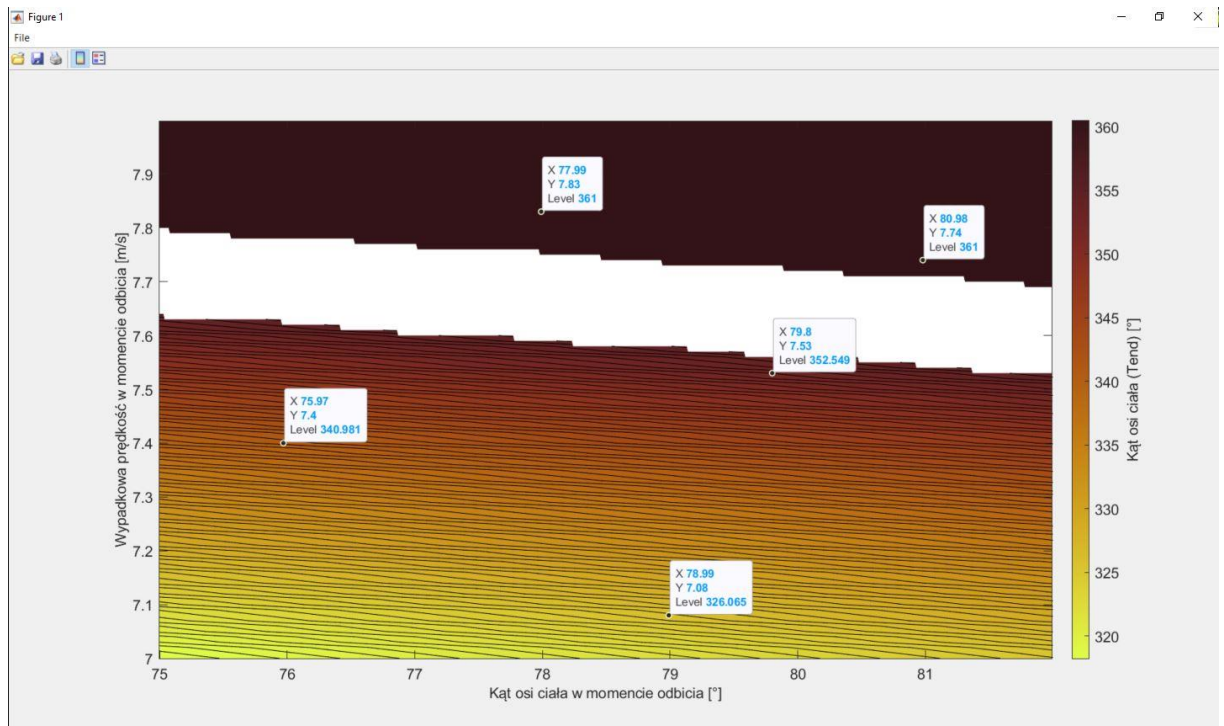
- ROZPRAWA DOKTORSKA -



1.2)a)

Rysunek 47. Wyznaczanie faz na podstawie charakterystyk czasowych uśrednionego sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności, jego pochodnej oraz prędkości kątowej osi ciała. Oś pozioma to numer próbki, natomiast oś pionowa to skala względna umożliwiającą pokazanie różnych zmiennych na jednym wykresie.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

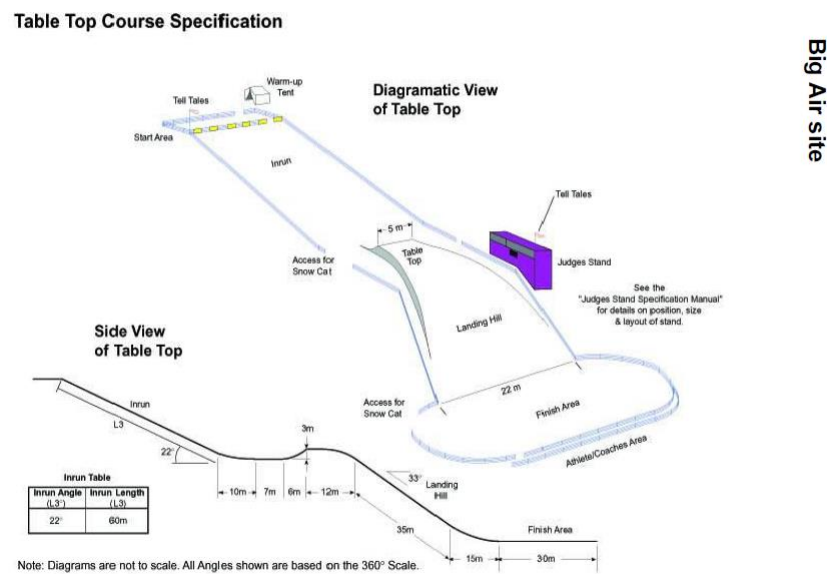


Rysunek 48. Modelowe rozwiązania dwóch wybranych przykładowo zmiennych we wskazanych zakresach wartości. W tym przypadku są to rozwiązania dla wartości wypadkowej prędkości oraz kąta osi ciała w momencie odbicia. Współrzędne podają dokładną wartość kąta lądowania. Biały obszar to zbiór rozwiązań zawierających się w granicy przyjętego zakresu lądowania.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

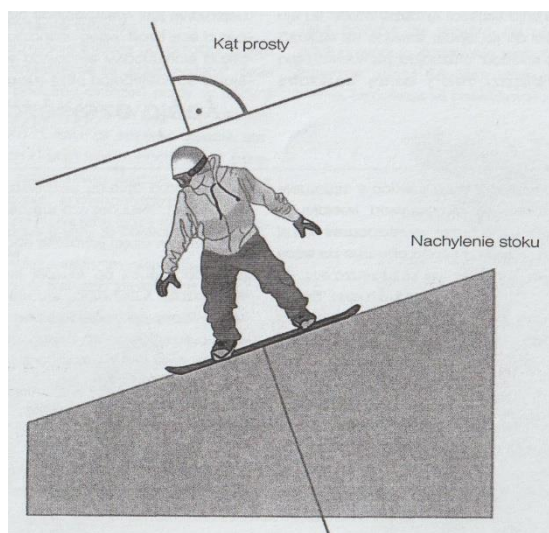
### 4.4. ETAP IV – OKREŚLENIE WARUNKÓW WYKONANIA FAZY LOTU W PODWÓJNYM SALCIE „WILDCAT” NA PODSTAWIE MODELU

Modelowanie warunków wykonania podwójnego salta „wildcat” rozpoczęto od ustalenia zakresu kąta położenia osi ciała zawodnika względem pionu dla uzyskania „bezpiecznego lądowania”. Jednym z czynników wpływających na ryzyko wystąpienia upadków jest ustawienie deski snowboardowej podczas lądowania (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2017). Nie znaleziono publikacji w której taki preferowany kąt zostałby podany. Dlatego na potrzeby modelowania przyjęto, że „bezpieczne lądowanie” mieści się w zakresie  $\pm 45^\circ$  pomiędzy osią długą deski a podłożem. Przełożenie tej wartości na kąt osi ciała (niezbędny do wprowadzenia do modelu) opiera się na dwóch zależnościach. Pierwsza z nich to budowa skoczni „big air”. Kąt pola lądowania zgodnie z obowiązującymi wytycznymi do przeprowadzenia zawodów wynosi  $33^\circ$  (rys. 49) (FIS 2019). Druga zależność to ustawienie ciała zawodnika w stosunku do deski. Podczas „swobodnej jazdy” jest to kąt  $90^\circ$  (Marciniak 2007) (rys. 50). Wiedząc, że po wykonaniu ewolucji zawodnik lądując nie zatrzymuje się, tylko kontynuuje zjazd (najlepiej w płynny sposób), to kąt osi ciała podczas lądowania powinien być taki sam jak ten podczas zjazdu. Podsumowując, zakres „bezpiecznego lądowania” dla salt podwójnych wyznaczono jako ustawienie osi ciała zawodnika względem pionu pod kątem od  $642^\circ$  do  $732^\circ$ , czyli  $(360^\circ \times 2 \text{ obroty} \pm 45^\circ) - 33^\circ$ .



Rysunek 49. Wytyczne budowy skoczni „big air” do przeprowadzenia zawodów (FIS 2019).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -



Rysunek 50. Ustawienie ciała zawodnika w stosunku do deski snowboardowej oraz nachylenia stoku podczas zjazdu (Marciniak 2007).

Najważniejszym elementem modelowania jest uzyskanie takich wartości zmiennych brzegowych, po których model wskaże wykonanie podwójnego salta. Zmienne stanowiące wielkości początkowe modelu to: wartość wypadkowego wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu ( $V$ ), kąt wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu (w stosunku do poziomu) ( $\angle V$ ), kąt osi ciała zawodnika na początku fazy lotu (w stosunku do pionu) ( $\angle \text{ciała}$ ), moment pędu zawodnika nadany w trakcie fazy odbicia ( $L$ ), czas trwania fazy utrzymania zgrupowanej pozycji ( $t_{\text{utr.}}$ ) (rozdział 4.3.2.). Oparto się na danych empirycznych uzyskanych z salt pojedynczych zgodnie z ich realizacją według strategii „U” i „V” (tab. 7).

Tabela 7. Wartości zmiennych brzegowych z uśrednionych zaimportowanych danych empirycznych dla strategii „U” i „V”.

STRATEGIA	V [m/s]	SD	$\angle V$ [°]	SD	$\angle \text{ciała}$ [°]	SD	L [m <sup>2</sup> /s]	SD	$t_{\text{utr.}}$ [s]
„U”	7.34	0.54	44.33	2.27	77.95	6.86	0.28	0.1	0.42
„V”	7.05	0.34	46.12	2.29	78.73	6.08	0.41	0.08	0.01

Modelowanie zostało zrealizowane w oparciu o charakterystykę sumarycznego momentu bezwładności otrzymanego z uśrednionego przebiegu osobno dla salt realizowanych zgodnie ze strategią „U” i „V”. Podczas modelowania postanowiono nie zmieniać wartości  $t_{\text{utr.}}$ , aby w uzyskanych wynikach dla salt podwójnych zawodnik mógł zachowywać się identycznie, tj. „grupować się” i „otwierać” w ten sam sposób co podczas salt pojedynczych. Takie podejście pozwoli na zmianę fazy początkowej, tj. najazdu z odbiciem, bez ingerencji w fazę główną, tj. lotu. Wtedy zawodnik zrealizuje lot jak wcześniej, ale dla nowych wartości brzegowych.



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Wynik będący kątem lądowania (kątem osi ciała) zostanie zweryfikowany, czyli czy mieści się w zakresie przyjętych granic dla salta podwójnego.

Przyjęto następujący schemat postępowania podczas modelowania:

- 1) wprowadzenie danych empirycznych zgodnych z wybraną strategią [ver1],
- 2) zwiększenie wartości zmiennej  $V$  o jedno odchylenie standardowe (+ 1SD) [ver2],
- 3) zwiększenie wartości zmiennej  $\phi V$  o jedno odchylenie standardowe (+ 1SD) [ver3],
- 4) zwiększenie wartości zmiennej  $\phi$  ciała o jedno odchylenie standardowe (+ 1SD) [ver4],
- 5) zwiększenie wartości zmiennej  $L$  o jedno odchylenie standardowe (+ 1SD) [ver5],
- 6) zwiększenie wartości wszystkich zmiennych o jedno odchylenie standardowe [ver6],
- 7) wprowadzenie danych z ver6 oraz zwiększenie wartości zmiennej o dwa odchylenia standardowe (+ 2SD) dla której wynik (kątem końcowy) w poprzednich wariantach osiągnął największą wartość [ver7],
- 8) wprowadzenie danych z ver7 oraz zwiększenie wartości zmiennej o dwa odchylenia standardowe (+ 2SD) dla której wynik (kątem końcowy) w poprzednich wariantach w drugiej kolejności osiągnął największą wartość [ver8],
- 9) wprowadzenie danych z ver8 oraz zwiększenie wartości zmiennej o dwa odchylenia standardowe (+ 2SD) dla której wynik (kątem końcowy) w poprzednich wariantach w trzeciej kolejności osiągnął największą wartość [ver9],
- 10) zwiększenie wartości wszystkich zmiennych o dwa odchylenia standardowe [ver10],
- 11) wprowadzenie danych z ver10 oraz zwiększenie wartości zmiennej wybranej w ver7 o trzy odchylenia standardowe (+ 3SD) [ver11],
- 12) wprowadzenie danych z ver11 oraz zwiększenie wartości zmiennej wybranej w ver8 o trzy odchylenia standardowe (+ 3SD) [ver12],
- 13) wprowadzenie danych z ver12 oraz zwiększenie wartości zmiennej wybranej w ver9 o trzy odchylenia standardowe (+ 3SD) [ver13],
- 14) zwiększenie wartości wszystkich zmiennych o trzy odchylenia standardowe [ver14].

Modelowanie realizowano do wyczerpania wszystkich wskazanych kroków. Wybór wprowadzania wartości zmiennych opartych na danych empirycznych zwiększanych o odchylenia standardowe był spowodowany koniecznością doboru realnych do uzyskania przez zawodników parametrów. Poszczególne wyniki modelowania zostały przedstawione w tabelach 8-10.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

Kolumna „ver” odpowiada przyjętym krokom modelowania, kolumny „wynik” przedstawiają wartość uzyskanego z modelowania kąta osi ciała w trakcie lądowania, natomiast kolumny „zmienna” i „wartość” opisują zmienne które zostały na poziomie empirycznym lub które zwiększono o odchylenia standardowe wraz z podaniem ich wartości (bazując na stanie początkowych z tabeli 7). Wynik gwarantujący wykonanie podwójnego salta z „bezpiecznym lądowaniem” oznaczono pogrubieniem (czyli zakres kąta osi ciała pomiędzy 642° a 732°).

*Tabela 8. Warianty modelowania skutkujące realizacją podwójnego salta „wildcat” zgodnie ze strategią „U” i „V” dla kroków 1-6.*

VER	MODEL STRATEGII „U”			MODEL STRATEGII „V”		
	WYNIK	ZMIENNA	WARTOŚĆ	WYNIK	ZMIENNA	WARTOŚĆ
1	351.76°	V	7.34m/s	369.03°	V	7.05m/s
		$\nabla$ V	44.33°		$\nabla$ V	46.12°
		$\nabla$ ciała	77.95°		$\nabla$ ciała	78.73°
		L	0.28m <sup>2</sup> /s		L	0.41m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
2	370.2°	V+1SD	7.88m/s	382.63°	V+1SD	7.39m/s
		$\nabla$ V	44.33°		$\nabla$ V	46.12°
		$\nabla$ ciała	77.95°		$\nabla$ ciała	78.73°
		L	0.28m <sup>2</sup> /s		L	0.41m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
3	361.52°	V	7.34m/s	379.56°	V [m/s]	7.05m/s
		$\nabla$ V+1SD	46.60°		$\nabla$ V+1SD	48.41°
		$\nabla$ ciała	77.95°		$\nabla$ ciała	78.73°
		L	0.28m <sup>2</sup> /s		L	0.41m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
4	358.5°	V	7.34m/s	374.76°	V	7.05m/s
		$\nabla$ V	44.33°		$\nabla$ V	46.12°
		$\nabla$ ciała+1SD	84.81°		$\nabla$ ciała+1SD	84.81°
		L	0.28m <sup>2</sup> /s		L	0.41m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

5	449.55°	V	7.34m/s	425.67°	V	7.05m/s
		$\alpha V$	44.33°		$\alpha V$	46.12°
		$\alpha$ ciała	77.95°		$\alpha$ ciała	78.73°
		L+1SD	0.38m <sup>2</sup> /s		L+1SD	0.49m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
6	496.04°	V+1SD	7.88m/s	462.15°	V+1SD	7.39m/s
		$\alpha V+1SD$	46.60°		$\alpha V+1SD$	48.41°
		$\alpha$ ciała+1SD	84.81°		$\alpha$ ciała+1SD	84.81°
		L+1SD	0.38m <sup>2</sup> /s		L+1SD	0.49m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s

Modelowanie rozpoczęto od wprowadzenia uśrednionych wyników obu strategii do odpowiednich modeli (dla „U” i „V”). Krok nr 1 przedstawia realizację salta pojedynczego zgodnie z danymi empirycznymi (tab. 8, patrz: ver1). Następnie każdą z możliwych do modelowania zmiennych zwiększano o jedno odchylenie standardowe (oprócz t\_utr., co zostało wcześniej uzasadnione). W efekcie największy przyrost kąta lądowania uzyskano przy zmianie momentu pędu zarówno dla strategii „U” (przyrost o 97.79°) i dla strategii „V” (przyrost o 56.64°) (tab. 8, patrz: ver5). Zmienną w drugiej kolejności powodującą największy przyrost kąta była wartość wypadkowej prędkości ponownie w przypadku obu strategii, tj. „U” (przyrost o 18.44°) i „V” (przyrost o 13.06°) (tab. 8, patrz: ver2). Trzecią zmienną był kąt wektora prędkości dla strategii „U” (przyrost o 9.76°), jak i „V” (przyrost o 10.53°) (tab. 8, patrz: ver3). Ostatnią zmienną wpływającą na przyrost kąta lądowania był kąt osi ciała w momencie wylotu w obu strategiach, tj. „U” (przyrost o 6.74°) i „V” (przyrost o 5.73°) (tab. 8, patrz: ver4). Zauważa się tę samą kolejność co do zmiennych „podnoszących wynik” zarówno w przypadku strategii „U” jak i „V”. Wydaje się to właściwą zależnością. W powyższych krokach nie osiągnięto wartości kąta lądowania dla wykonania salta podwójnego. Krok nr 6 przedstawia wynik uzyskany po podniesieniu wszystkich zmiennych o jedno odchylenie standardowe (tab. 8, patrz: ver6). Do realizacji salta podwójnego brakuje jeszcze minimum 145.96° w przypadku strategii „U” i 179.85° w strategii „V”.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

Tabela 9. Warianty modelowania skutkujące realizacją podwójnego salta „wildcat” zgodnie ze strategią „U” i „V” dla kroków 7-10.

VER	MODEL STRATEGII „U”			MODEL STRATEGII „V”		
	WYNIK	ZMIENNA	WARTOŚĆ	WYNIK	ZMIENNA	WARTOŚĆ
7	604.26°	V+1SD	7.88m/s	523.76°	V+1SD	7.39m/s
		∠V+1SD	46.60°		∠V+1SD	48.41°
		∠ciała+1SD	84.81°		∠ciała+1SD	84.81°
		L+2SD	0.48m <sup>2</sup> /s		L+2SD	0.57m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
8	637.35°	V+2SD	8.42m/s	543.97°	V+2SD	7.73m/s
		∠V+1SD	46.60°		∠V+1SD	48.41°
		∠ciała+1SD	84.81°		∠ciała+1SD	84.81°
		L+2SD	0.48m <sup>2</sup> /s		L+2SD	0.57m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
9	<b>656.39°</b>	V+2SD	8.42m/s	559.51°	V+2SD	7.73m/s
		∠V+2SD	48.87°		∠V+2SD	50.70°
		∠ciała+1SD	84.81°		∠ciała+1SD	84.81°
		L+2SD	0.48m <sup>2</sup> /s		L+2SD	0.57m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
10	<b>663.25°</b>	V+2SD	8.42m/s	565.59°	V+2SD	7.73m/s
		∠V+2SD	48.87°		∠V+2SD	50.70°
		∠ciała+2SD	91.67°		∠ciała+2SD	90.89°
		L+2SD	0.48m <sup>2</sup> /s		L+2SD	0.57m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s

W następnych krokach modelowania bazowano na wartościach zmiennych zwiększonych o jedno odchylenie standardowe, modyfikując je poprzez stopniowe zmiany o dwa odchylenia standardowe (zgodnie z kolejnością wynikającą z wcześniejszych kroków). W modelu strategii „U” zanotowano przyrost kąta lądowania o 167.21°, zaś w modelu strategii „V” o 103.44°. W tej części modelowania uzyskano zmienne brzegowe gwarantujące wykonanie podwójnego salta „wildcat” dla dwóch kroków, tj. 9 i 10 w modelowaniu strategii „U” (tab. 9, patrz: ver9, ver10). Nadal nie spełniono wymagań do „wykręcenia” salta podwójnego w modelowaniu strategii „V” (zabrakło 76.41°).

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

Tabela 10. Warianty modelowania skutkujące realizacją podwójnego salta „wildcat” zgodnie ze strategią „U” i „V” dla kroków 11-14.

VER	MODEL STRATEGII „U”			MODEL STRATEGII „V”		
	WYNIK	ZMIENNA	WARTOŚĆ	WYNIK	ZMIENNA	WARTOŚĆ
11	782.33°	V+2SD	8.42m/s	632.22°	V+2SD	7.73m/s
		∠V+2SD	48.87°		∠V+2SD	50.70°
		∠ciała+2SD	91.67°		∠ciała+2SD	90.89°
		L+3SD	0.58m <sup>2</sup> /s		L+3SD	0.65m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
12	823.82°	V+3SD	8.96m/s	656.14°	V+3SD	8.07m/s
		∠V+2SD	48.87°		∠V+2SD	50.70°
		∠ciała+2SD	91.67°		∠ciała+2SD	90.89°
		L+3SD	0.58m <sup>2</sup> /s		L+3SD	0.65m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
13	846.82°	V+3SD	8.96m/s	674.31°	V+3SD	8.07m/s
		∠V+3SD	51.14°		∠V+3SD	52.99°
		∠ciała+2SD	91.67°		∠ciała+2SD	90.89°
		L+3SD	0.58m <sup>2</sup> /s		L+3SD	0.65m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s
14	853.68°	V+3SD	8.96m/s	680.39°	V+3SD	8.07m/s
		∠V+3SD	51.14°		∠V+3SD	52.99°
		∠ciała+3SD	98.53°		∠ciała+3SD	96.97°
		L+3SD	0.58m <sup>2</sup> /s		L+3SD	0.65m <sup>2</sup> /s
		t_utrzy.	0.42s		t_utrzy.	0.01s

Ostatnie kroki modelowania to bazowanie na wartościach zmiennych zwiększonych o dwa odchylenia standardowe, które stopniowo zwiększano o trzy odchylenia standardowe (zgodnie z kolejnością wynikającą z kroków 1-6). W modelu strategii „U” zanotowano przyrost kąta lądowania o 190.43°, zaś w modelu strategii „V” o 114.8°. W tej części modelowania uzyskano zmienne brzegowe gwarantujące wykonanie podwójnego salta „wildcat” dla trzech wariantów, tj. 12, 13 i 14 w modelowaniu strategii „V” (tab. 10, patrz: ver12, ver13, ver14). Nie uzyskano wyniku mieszczącego się w zakresie „bezpiecznego lądowania” dla wykonania podwójnego salta dla strategii „U” (wszystkie warianty przekraczały ten zakres, tzn. były „przekrecone”).

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

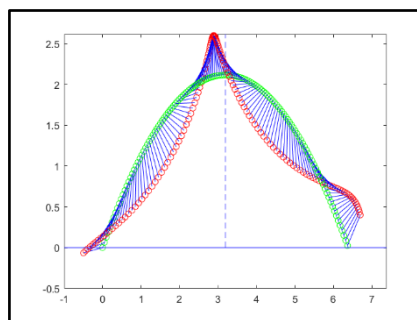
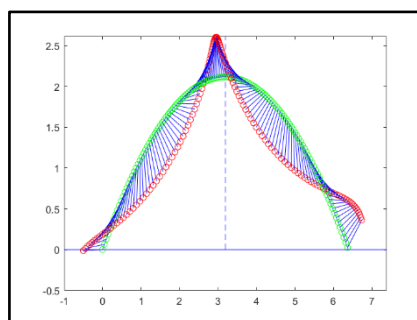
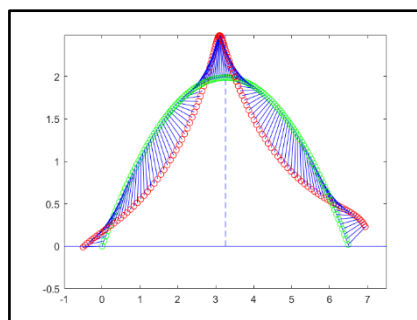
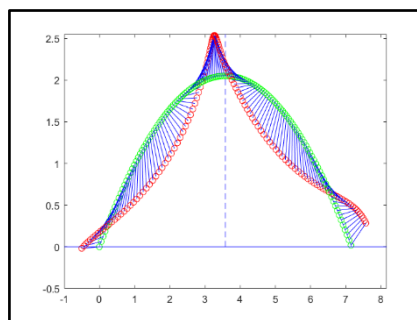
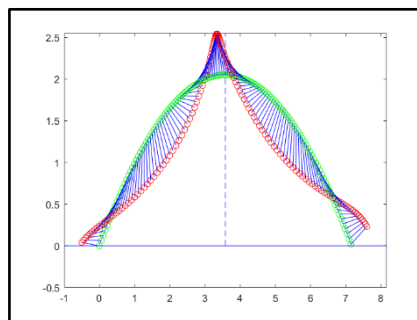
Modelowanie w stworzonej aplikacji zostało przedstawione w postaci materiału filmowego, który można odtworzyć po zeskanowaniu kodów QR (rys. 51). Zawiera modelowanie salta pojedynczego zgodnie z danymi empirycznymi strategii „U” (rys. 51a) i „V” (rys. 51b) oraz pierwszy przykładowy wariant zamodelowania salta podwójnego, tj. wariant 9\_U (rys. 51c). Wszystkie warianty zamodelowanych salt podwójnych zestawiono na rysunku 52 wraz ze zobrazowaniem ich animacji z modelu.



*Rysunek 51. Odnośniki do materiałów filmowych w postaci kodów QR przedstawiających modelowanie w stworzonej aplikacji. Zawiera salto pojedyncze modelowane strategiami „U” (A) i „V”(B) oraz przykładowe salto podwójne (C).*

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

WARIANT 9_U			
WYNIK	ZMIENNA	STRATEGIA	WARTOŚĆ
656.39°	V+2SD	„U”	8.42m/s
	∠V+2SD		48.87°
	∠ciała+1SD		84.81°
	L+2SD		0.48m <sup>2</sup> /s
	t_utrzy.		0.42s
WARIANT 10_U			
WYNIK	ZMIENNA	STRATEGIA	WARTOŚĆ
663.25°	V+2SD	„U”	8.42m/s
	∠V+2SD		48.87°
	∠ciała+2SD		91.67°
	L+2SD		0.48m <sup>2</sup> /s
	t_utrzy.		0.42s
WARIANT 12_V			
WYNIK	ZMIENNA	STRATEGIA	WARTOŚĆ
656.14°	V+3SD	„V”	8.07m/s
	∠V+2SD		50.70°
	∠ciała+2SD		90.89°
	L+3SD		0.65m <sup>2</sup> /s
	t_utrzy.		0.01s
WARIANT 13_V			
WYNIK	ZMIENNA	STRATEGIA	WARTOŚĆ
674.31°	V+3SD	„V”	8.07m/s
	∠V+3SD		52.99°
	∠ciała+2SD		90.89°
	L+3SD		0.65m <sup>2</sup> /s
	t_utrzy.		0.01s
WARIANT 14_V			
WYNIK	ZMIENNA	STRATEGIA	WARTOŚĆ
680.39°	V+3SD	„V”	8.07m/s
	∠V+3SD		52.99°
	∠ciała+3SD		96.97°
	L+3SD		0.65m <sup>2</sup> /s
	t_utrzy.		0.01s



Rysunek 52. Przedstawienie wariantów modelowania dla realizacji salt podwójnych ze wskazaniem zmiennych brzegowych, ich uzasadnieniem oraz animacją zaczerpniętą z modelu.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### 4.5. ETAP V – WALIDACJA MODELU POPRZEZ PORÓWNANIE UZYSKANYCH W FAZIE LOTU WYNIKÓW PODWÓJNEGO SALTA „WILDCAT” Z WYNIKAMI RZECZYWISTYMI (EMPIRYCZNYMI)

Ostatnim celem operacyjnym dysertacji jest walidacja modelu. Mimo, iż badania dotyczyły pomiarów pojedynczego salta „wildcat”, to dwóch zawodników potrafiło wykonać ten trik w wersji podwójnego salta. Każdy z nich zrealizował 5 takich skoków uznanych za poprawnie wylądowane. Z przyczyn technicznych (wskazanych w rozdziale 3.5.) 7 prób zawierało kompletne dane i można było poddać je dalszej analizie (tj. 4 próby zawodnika nr 1 oraz 3 próby zawodnika nr 7).

Walidacja modelu została podzielona na trzy części:

- 1) dane empiryczne otrzymane z uśrednionego przebiegu salt podwójnych wprowadzono do programu dla strategii „U” oraz dla strategii „V” w celu weryfikacji modelowego kąta osi ciała przy lądowaniu z wynikiem rzeczywistym,
- 2) porównano zestawy zmiennych brzegowych z danymi empirycznymi otrzymanymi z uśrednionego przebiegu salt podwójnych z danymi wprowadzanymi do modelowania, warunkującymi wykonanie podwójnego salta zgodnie z modelowym wynikiem końcowym,
- 3) dane empiryczne wybranych poszczególnych prób salt podwójnych wprowadzono do programu dla strategii "U" oraz dla strategii "V" w celu weryfikacji modelowego kąta osi ciała przy lądowaniu z wynikiem rzeczywistym danej próby.



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

### 4.5.1 CZĘŚĆ PIERWSZA WALIDACJI MODELU

Zmienne brzegowe uzyskane z empirycznych salt podwójnych (tab. 11) zostały wprowadzone do modelu. Zastosowano dwa warianty modelowania – z wykorzystaniem uśrednionego przebiegu salta pojedynczego dla strategii „U” oraz „V”.

*Tabela 11. Zmienne brzegowe uzyskane z podwójnych salt empirycznych.*

„WILDCAT”	V [m/s]	SD	$\varphi V$ [°]	SD	$\varphi$ ciała [°]	SD	L [m <sup>2</sup> /s]	SD	t_utrzy. [s]
podwójne	7.95	0.07	43.17	3.5	101.25	11.5	0.5	0.12	0.5

W celu pozostawienia charakterystyki czasowej sumarycznego momentu bezwładności dla skoków danej strategii, w modelu nie zmieniano t\_utr.. Rzeczywisty średni kąt osi ciała w trakcie lądowania dla salt podwójnych wynosił 654.6° i został porównany z wynikami modelowania (tab. 12).

*Tabela 12. Wyniki modelowania według strategii „U” i „V” po wprowadzeniu danych empirycznych salt podwójnych bez uwzględnienia czasu utrzymania zgrupowanej pozycji ciała.*

ZMIENNA	MODEL STRATEGII „U”		MODEL STRATEGII „V”	
	WARTOŚĆ	WYNIK	WARTOŚĆ	WYNIK
V	7.95m/s	640.36°	7.95m/s	498.5°
$\varphi V$	44.17°		44.17°	
$\varphi$ ciała	101.25°		101.25°	
L	0.5m <sup>2</sup> /s		0.5m <sup>2</sup> /s	
t_utrzy.	<b>0.42s</b>		<b>0.01s</b>	

Okazało się, że model mimo wprowadzenia rzeczywistych danych nie wskazał realizacji podwójnego salta opartego o „bezpieczne lądowanie”. Można zauważyć, że dla modelowania według strategii „U” zabrakło 1.64° do dolnej granicy przyjętego zakresu kąta lądowania i wynik ten był mniejszy od realnego o 14.24°, co stanowi jedynie 2.18% różnicy. Natomiast w modelowaniu według strategii „V” odnotowano różnicę 156.1°, co mogło zostać spowodowane inną fazową strukturą ruchu, tj. brakiem fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, która występowała w przypadku prób salt podwójnych (t\_utr. 0.5s, patrz: tab. 11). Z uwagi na ten fakt postanowiono uwzględnić empiryczny czas fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, z zachowaniem czasu fazy grupowania strategii „U” i „V”.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Tabela 13. Wyniki modelowania według strategii „U” i „V” po wprowadzeniu danych empirycznych salt podwójnych z uwzględnieniem czasu utrzymania zgrupowanej pozycji ciała.

ZMIENNA	MODEL STRATEGII „U”		MODEL STRATEGII „V”	
	WARTOŚĆ	WYNIK	WARTOŚĆ	WYNIK
V	7.95m/s	<b>642.82°</b>	7.95m/s	513.81°
$\alpha V$	44.17°		44.17°	
$\alpha$ ciała	101.25°		101.25°	
L	0.5m <sup>2</sup> /s		0.5m <sup>2</sup> /s	
t_utrzy.	<b>0.5s</b>		<b>0.5s</b>	

W modelowaniu według strategii „U” spowodowało to zwiększenie kąta lądowania o 2.46°, co dało wynik wskazujący na wykonanie salta podwójnego dla przyjętych założeń „bezpiecznego lądowania”. Również różnica między wynikiem modelowym a empirycznym zmniejszyła się do 1.8%. W modelowaniu według strategii „V” zaobserwowano zwiększenie wyniku o 15.31°, co potwierdza iż t\_utr. jest znaczącym elementem struktury ruchu. Być może model nie wskazuje wykonania podwójnego salta (brakuje minimum 128.19°), gdyż charakterystyka czasowa sumarycznego momentu bezwładności dla skoków podwójnych jest odmienna w porównaniu ze strategią „V”.

### 4.5.2 CZĘŚĆ DRUGA WALIDACJI MODELU

Zestawiono dane uzyskane podczas modelowania (mające służyć realizacji salt podwójnych) z danymi empirycznymi. Przetawiono je w tabelach 14-18. Zamieszczono nazwy zmiennych brzegowych i ich wartości dla uśrednionego salta podwójnego (otrzymanego z badań) oraz salta modelowego z podanego wariantu zgodnie ze schematem opisu „ver (numer kroku modelowania)\_(zastosowany model strategii)”. Najmniejszy % różnicy dla zmiennej wartości wypadkowego wektora prędkości dotyczył wariantu zwiększenia wartości o 3SD dla strategii „V” (tab. 16, tab. 17, tab. 18). W przypadku zmiennej kąta wylotu wektora prędkości był to wariant zwiększenia wartości o 2SD dla strategii „U” (tab. 14, tab. 15), dla kąta osi ciała podczas wylotu – wariant zwiększenia wartości o 3SD dla strategii „V” (tab. 18), dla momentu pędu – wariant zwiększenia wartości o 2SD (tab. 14, tab. 15). Czas utrzymania zgrupowanej pozycji ciała zdecydowanie odpowiadał strategii „U” (16% błędu) (tab. 14, tab. 15) niż strategii „V” (98% błędu) (tab. 16, tab. 17, tab. 18).

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

*Tabela 14. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 9 modelowania strategią „U”.*

PODWÓJNE	V [m/s]	$\alpha V$ [°]	$\alpha$ ciała [°]	L [m <sup>2</sup> /s]	t_utrzy. [s]	WYNIK [°]
UŚREDNIONE	7.95	43.17	101.25	0.5	0.5	654.6
VER9_U	8.42	48.87	84.81	0.48	0.42	656.39
RÓŻNICA	0.47	5.7	16.44	0.02	0.08	1.79
% RÓŻNICY	5.91%	13.2%	16.24%	4%	16%	0.27%

*Tabela 15. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 10 modelowania strategią „U”.*

PODWÓJNE	V [m/s]	$\alpha V$ [°]	$\alpha$ ciała [°]	L [m <sup>2</sup> /s]	t_utrzy. [s]	WYNIK [°]
UŚREDNIONE	7.95	43.17	101.25	0.5	0.5	654.6
VER10_U	8.42	48.87	91.67	0.48	0.42	663.25
RÓŻNICA	0.47	5.7	9.58	0.02	0.08	8.65
% RÓŻNICY	5.91%	13.2%	9.46%	4%	16%	1.32%

*Tabela 16. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 12 modelowania strategią „V”.*

PODWÓJNE	V [m/s]	$\alpha V$ [°]	$\alpha$ ciała [°]	L [m <sup>2</sup> /s]	t_utrzy. [s]	WYNIK [°]
UŚREDNIONE	7.95	43.17	101.25	0.5	0.5	654.6
VER12_V	8.07	50.70	90.89	0.65	0.01	656.14
RÓŻNICA	0.12	7.53	10.36	0.15	0.49	1.54
% RÓŻNICY	1.5%	17.44%	10.23%	30%	98%	0.24%

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

*Tabela 17. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 13 modelowania strategią „V”.*

PODWÓJNE	V [m/s]	$\alpha V$ [°]	$\alpha$ ciała [°]	L [m <sup>2</sup> /s]	t_utrzy. [s]	WYNIK [°]
UŚREDNIONE	7.95	43.17	101.25	0.5	0.5	654.6
VER13_V	8.07	52.99	90.89	0.65	0.01	674.31
RÓŻNICA	0.12	9.82	10.36	0.15	0.49	19.71
% RÓŻNICY	1.5%	22.75%	10.23%	30%	98%	3.01%

*Tabela 18. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 14 modelowania strategią „V”.*

PODWÓJNE	V [m/s]	$\alpha V$ [°]	$\alpha$ ciała [°]	L [m <sup>2</sup> /s]	t_utrzy. [s]	WYNIK [°]
UŚREDNIONE	7.95	43.17	101.25	0.5	0.5	654.6
VER14_V	8.07	52.99	96.97	0.65	0.01	680.39
RÓŻNICA	0.12	9.82	4.28	0.15	0.49	25.79
% RÓŻNICY	1.5%	22.75%	4.23%	30%	98%	3.94%

Ponieważ wykonanie salta podwójnego jest efektem wypadkowego działania wszystkich zmiennych brzegowych, oceniono który z zestawów modelowych sumarycznie najmniej różnił się od zbioru empirycznego. Najmniejsza średnia różnica całego zbioru wartości brzegowych występuje dla wariantu 10U (9.71%).

### 4.5.3 CZĘŚĆ TRZECIA WALIDACJI MODELU

Ostatnią część walidacji stanowiło wprowadzenie do modelu danych empirycznych poszczególnych przykładowych salt podwójnych z pomiarów. Z uwagi na informacje uzyskane z poprzednich części walidacji wybrano jedynie modelowanie zgodne ze strategią „U”, gdyż ta charakterystyka odpowiada rzeczywistemu wykonaniu podwójnego salta. Zestawiono po dwa przykładowe skoki każdego z zawodników. Podczas analizy wszystkich prób występowały różnice w uzyskanych wynikach (tab. 19). Zauważono, że wszystkie wyniki modelowe prezentują mniejszy kąt niż ten wynikający z danych rzeczywistych. W przypadku salt, gdzie zawodnik był blisko „granicy” „bezpiecznego lądowania” (tab. 19, patrz: zaw1\_salto5,

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

zaw7\_salto2) model wskazywał wynik, który należy interpretować jako brak realizacji salta podwójnego, natomiast w przypadkach kiedy był blisko „wykręcenia” dwóch „pełnych” obrotów na stoku o nachyleniu 33°, czyli lądowanie z deską równoległe do podłoża przy założeniu ustawienia osi ciała zawodnika prostopadle do deski snowboardowej (tj. kąt 687°, czyli 360° x 2 obroty – 33°), model wskazywał wykonanie salt podwójnych.

*Tabela 19. Wartości brzegowe i kąt osi ciała na koniec fazy lotu dla wybranych prób salta podwójnego z pomiarów rzeczywistych oraz wynik uzyskany z modelu na bazie charakterystyki strategii „U” uśrednionych salt pojedynczych.*

ZMIENNA	PODWÓJNE SALTO			
	zaw1_salto1	zaw1_salto5	zaw7_salto2	zaw7_salto3
V [m/s]	8.0	7.95	7.8	7.98
$\angle V$ [°]	44.5	44.17	39.21	42.3
$\angle$ ciała [°]	95.5	98.76	105.2	103.82
L [m <sup>2</sup> /s]	0.5	0.485	0.5	0.51
t_utrzy. [s]	0.49	0.5	0.52	0.56
KĄT KOŃCOWY OSI CIAŁA [°]				
z pomiarów	687.19	646.63	646.47	690.13
z modelu	655.17	635.27	598.34	653.5

Wykonano pogłębioną analizę struktury rzeczywistych salt podwójnych w aspekcie różnic względem salt pojedynczych. Wynik wskazał na nieco mniejsze prędkości obrotowe podczas lotu w saltie pojedynczym, co jest efektem bardziej efektywnego grupowania pozycji ciała podczas wykonania salt podwójnych (tab. 20). Średnio w fazie grupowania pozycji / otwierania pozycji prędkość była mniejsza względem prędkości modelowej o około 3%, zaś w fazie utrzymania zgrupowanej pozycji o około 10%.

*Tabela 20. Wartości prędkości obrotowych [°/s] w fazie grupowania pozycji / otwierania pozycji ( $\omega 1$ ) i utrzymania pozycji podczas lotu ( $\omega 2$ ).*

ZMIENNA	PODWÓJNE SALTO							
	zaw1_salto1		zaw1_salto5		zaw7_salto2		zaw7_salto3	
$\omega$ [°/s]	$\omega 1$	$\omega 2$	$\omega 1$	$\omega 2$	$\omega 1$	$\omega 2$	$\omega 1$	$\omega 2$
z pomiarów	449.5	583.9	439.47	516.64	430.98	621.3	458.4	595.7
z modelu	430.78	520.75	418.05	505.13	430.78	520.75	439.6	531.17
% różnicy	4.3	12.1	5.1	2.3	0.1	19.3	4.2	12.1

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Zatem postanowiono wykonać modyfikację modelu, w której operator aplikacji do modelowania ma możliwość zastosowania poprawki powodującej zwiększenie prędkości obrotowej właśnie o te średnie wartości procentowe we wskazanych fazach lotu (rys. 53).

The screenshot shows a software interface titled "Modelowanie". It contains several input fields and controls:

- V (T0):** Input field
- Kąt wektora prędkości (T0):** Input field
- Kąt osi ciała (T0):** Input field
- T utrzymania:** Input field
- Moment pędu:** Input field
- Rozdzielczość:** Input field with value 0.001
- Wymagany kąt osi ciała (Tend): - minimalny:** Input field
- Omega 1:** Input field (highlighted in red)
- Omega 2:** Input field (highlighted in red)
- Omega 3:** Input field (highlighted in red)
- Animować?** Radio buttons for "Tak" (selected) and "Nie"
- Liczba obrotów:** Input field
- Kąt osi ciała (Tend):** Input field
- Modeluj** button

Rysunek 53. Fragment okna aplikacji modelowania po wprowadzeniu modyfikacji. Widoczne miejsca do „ręcznego” wpisania wartości prędkości kątowych.

Zastosowanie opisaney wyżej możliwości poprawy prędkości kątowej do modelowania salta podwójnego skutkuje mniejszą różnicą w wynikach między wartością rzeczywistą, a tą otrzymaną z modelu (tab. 21).

Tabela 21. Kąt osi ciała na koniec fazy lotu dla wybranych prób salta podwójnego z pomiarów rzeczywistych oraz wynik uzyskany z modelu na bazie charakterystyki strategii „U” uśrednionych salt pojedynczych i po zastosowaniu poprawki prędkości obrotowej. Wartości wejściowe do modelu takie jak w tabeli 19.

KĄT KOŃCOWY OSI CIAŁA [°]	PODWÓJNE SALTO			
	zaw1_salto1	zaw1_salto5	zaw7_salto2	zaw7_salto3
z pomiarów	687.19	646.63	646.47	690.13
z modelu początkowego	655.17	635.27	598.34	653.5
z modelu poprawionego	683.95	663.79	631.8	687.34

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Z przeprowadzonych porównań wyników modelowych i rzeczywistych można stwierdzić, iż model działa prawidłowo. Osoba wykonująca modelowanie powinna zdecydować z której wersji modelu (pierwotnej bądź zmodyfikowanej) skorzysta. Powinno to zostać oparte o doświadczenie zawodnika. Proponuje się, aby dla snowboardzistów uczących się podwójnego salta stosować pierwszą wersję modelu. Prawdopodobne zachowanie zawodnika w locie (zmiany sumarycznego momentu bezwładności wpływające na zmiany prędkości kątowej oraz czas utrzymania zgrupowanej pozycji) będzie zbliżone do tego prezentowanego podczas salt pojedynczych. Zmiany zaistnieją we wcześniejszych fazach ruchu (najazd z odbiciem), aby osiągnąć minimalne (wskazane przez model) wartości zmiennych brzegowych. Jednak zmienne te są w pełni mierzalne i możliwe do poprawy w bezpiecznych warunkach, tj. bez wykonywania ewolucji (np. realizując skok „ollie”). Osoba realizująca skok zgodnie ze wskazanymi w modelu wartościami zmiennych początkowych powinna wykonać podwójne salto nie znajdując się na granicy „bezpiecznego lądowania” (tab. 21, patrz: zaw1\_salto1, zaw7\_salto3). Natomiast w momencie kiedy zawodnik zachowuje się powtarzalnie podczas podwójnego salta „wildcat”, można wprowadzić modelowe rozwiązania wersji zmodyfikowanej. Podczas większej świadomości ruchu w kontroli nad grupowaniem pozycji ciała i utrzymaniem tej pozycji nastąpi zmiana prędkości obrotowej zawodnika. Wystąpi mniejsze ryzyko otrzymania „mylnej wskazówki” do wykonania podwójnego salta przy niższych wartościach zmiennych początkowych modelu. Większy stopień zgrupowania ciała (mniejsza wartość minimalnego sumarycznego momentu bezwładności) będzie skutkował wyższą wartością prędkości kątowej, co pozwoli na bezpieczne ustawienie osi ciała zawodnika podczas lądowania przy mniej obciążających zmiennych brzegowych.

## PODSUMOWANIE Z ELEMENTAMI DYSKUSJI

Analiza ruchu człowieka jest bardzo ciekawym zagadnieniem. Przede wszystkim łączy w sobie elementy teorii z praktyką. W sporcie m.in. biomechanika tłumaczy zjawiska fizyczne, pomagając zrozumieć zachowanie zawodnika (Knudson 2007). W efekcie dąży się do osiągnięcia jak najlepszych rezultatów sportowych, choć warto wspomnieć, iż takie naukowe działania realizowane są nie tylko w sporcie, dotyczą bowiem każdej sfery życia.

Pierwszym etapem analizy ruchu powinno być opisanie struktury kinematycznej. Informacja o położeniu poszczególnych ogniw łańcucha biokinematycznego względem siebie oraz całego osobnika w przestrzeni w trakcie wykonywania zadania umożliwia uzyskanie pełnego wyobrażenia o ruchu (Król, Mynarski 2005). Szczególnie dotyczy to czynności złożonych. Następnie, znając ich cel, można dokonać wyboru najistotniejszych położeń według przyjętego kryterium, co pozwala na jego podział na fazy. W takim układzie zdecydowanie precyzyjniej można kolejno wskazać cechy ruchu opisujące daną fazę, określaną za pomocą charakterystyk różnych parametrów mechanicznych. Ten etap został dokładnie opisany w powyższej rozprawie. Klasycznie rozpoczęto od wskazania kryteriów podziału lotu w saltie snowboardowym „wildcat” na fazy. Nie spodziewano się, iż zawodnicy wykonując to samo zadanie ruchowe będą prezentować odmienne struktury ruchu. Zidentyfikowano dwie strategie wykonania triku „wildcat”, tj. strategia „U” i „V”, nazwane tak z uwagi na kształt charakterystyki czasowej sumarycznego momentu bezwładności. Na ich rozpoznaniu zakończono analizę. Jednakże praca odkryła potencjalne nowe kierunki badań, pozwalające bardziej szczegółowo opisać i zrozumieć różnice w odkrytych strategiach „U” i „V” (salt pojedynczych) w obszarze kinematycznej struktury ruchu czy też schematu ruchu części ciała podczas grupowania i otwierania pozycji ciała. Albowiem poza przyjęte ramy pracy wykraczała także obserwacja udziału największej komponenty w sumarycznym momencie bezwładności, którą stanowiły kończyny dolne i set snowboardowy. Koncentrując uwagę na zachowaniu kończyn dolnych zauważono, że charakterystyka czasowa momentu bezwładności wywoływana przez poszczególne stopy w locie była odmienna w strategii „U” i „V”. Uśredniony przebieg w obu strategiach wykazał przesunięcie fazowe w „grupowaniu” i „otwieraniu” stóp. Zadano pytanie czy odmienny sposób przemieszczenia stóp odpowiadał za charakterystykę poszczególnych strategii grupowania pozycji ciała i utrzymania zgrupowanej pozycji ciała w locie w triku „wildcat”, co wymaga potwierdzenia w dalszych badaniach.



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Pamiętając, że analizie podlegają ruchy ludzkie należy spojrzeć ich „faktyczne” wykonywanie. Kolejne realizacje tego samego zadania ruchowego przez tę samą osobę nigdy nie będą identyczne. Jako jeden z pierwszych naukowców zwrócił na to uwagę Nikolai Bernstein używając określenia „powtarzanie bez powtarzalności”. Zjawisko to oceniane jest różnie, zależnie od perspektywy trzech dominujących teorii. Zgodnie z teorią GMPT (Generalized Motor Program Theory) (Summers, Anson 2009) zmienność w strukturze ruchu jest wynikiem błędów i szumów w układzie kontrolnym (Müller et al. 2017). Stanowi zakłócenie programu motorycznego i upośledzając go zwiększa zmienność parametrów ruchu. W efekcie nauczania i treningu błąd ten jest stopniowo eliminowany lub minimalizowany, optymalizując w ten sposób dokładność i efektywność schematu ruchu. Jednym z zadań osób uczących się czynności ruchowej jest redukcja zmienności ruchu (Jones 2012). Druga z teorii – UCM (uncontrolled manifold hypothesis) (Latash et al. 2002) utożsamia zmienność ruchów z ich nadmiarowością. Redundancja motoryczna oznacza posiadanie większej liczby elementów niż jest to konieczne do realizacji zadania, co powoduje istnienie wielu rozwiązań. Zgodnie z tą hipotezą, gdy system wykorzystujący wiele elementów zmienia stan poszczególnych części ale oczekiwany efekt pozostaje na stałym poziomie, układ nie musi ingerować. Oznacza to, że zmienność poszczególnych elementów jest dopuszczalna. Trzecia wielka teoria – DST (Dynamical Systems Theory) (Clark, Phillips 1993) zakłada, że systemy biologiczne samoorganizują się zgodnie z więzami tzn. ograniczeniami środowiskowymi, biomechanicznymi i morfologicznymi, aby znaleźć najbardziej stabilne rozwiązanie dla wykonania danego ruchu. Zwiększona zmienność wzorca wskazuje na utratę stabilności ruchu natomiast zmniejszona zmienność wskazuje na bardzo stabilne zachowanie układu. W świetle tej teorii zmienność ruchu może być także traktowana jako rodzaj potencjału adaptacyjnego lub kompensacyjnego, który może być wykorzystany do zmiany stanu układu w zmieniających się warunkach (Bradshaw, Maulder, Keogh 2007). Niezależnie od odmienności podejścia wszystkie teorie GMPT, UCM i DST są zgodne, że zmniejszona zmienność przynosi efekt w postaci skuteczniejszego wykonywania danego wzorca ruchowego (Stergiou, Decker 2011). Niestety zmienność jako niechciany błąd utrudnia prosty i jednoznaczny opis indywidualnej techniki ruchu. Co więcej, utrudnia wykrywanie małych różnic międzysobniczych lub zmian wewnątrzsobniczych, które często charakteryzują czynności sportowe (Preatoni et al. 2013). Badania zmienności ruchów na symulatorze snowboardowym wykazały, że zaawansowani cechują się mniejszą zmiennością niż początkujący (Park et al. 2015). W powyższej dysertacji została określona zmienność

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

badanego ruchu. Wyniki wskazały, że z uwagi na badanego zmienność w 45 saltach wykonanych przez 7 zawodników średnio osiągała wartość 28%. Najmniejszy współczynnik zmienności dla poszczególnych zawodników wynosił 11%, największy 23%. Można zauważyć, że te wartości były zbliżone do zmienności w innych badaniach sportów śnieżnych, gdzie CV wynosił około 30% (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2009; McAlpine et al. 2012; Nedergaard et al. 2015). Natomiast ze względu na moment realizacji ruchu, najbardziej stabilny lot dotyczył chwili czasowej najwyższego położenia COM2, tj. 10%, najmniej stabilny był początek lotu, tj. 22%. W przypadku parametrów pogrupowanych zgodnie z ich typem, najbardziej powtarzalne były te dotyczące prędkości w ruchu postępowym, tj. 9% oraz związane z sumarycznym momentem bezwładności, tj. 12%. Podczas analizy zmienności uwzględniającej strategię wykonania ruchu („U” i „V”) wartości współczynników zmienności (klasycznego i biologicznego) były zbliżone do 30%, co wskazało na przedział „przeciętnej zmienności”. Ten etap pozwolił na uwzględnienie zjawiska zmienności podczas modelowania i oceny jego wyników.

Pracę nad modelem rozpoczęto od stworzenia modelu deterministycznego, który jest powszechnie stosowany w badaniach biomechaniki sportu i ćwiczeń fizycznych (Chow, Knudson 2011). Niejednokrotnie dzięki jego zastosowaniu zostają określone wskazówki do prowadzenia treningu np. z wykorzystaniem skoku pionowego (Ham, Knez, Young 2007), wyjaśnia się technikę ruchu, wskazując zmienne mechaniczne związane np. z udanym wykonaniem skoku przez stół gimnastyczny w postaci salta w oparciu o oceny sędziowskie (Takei 2007), czy opisuje się istotne elementy poszczególnych faz ruchu np. w 5 fazach wyodrębnionych podczas skoku konia (Powers, Harrison 1999). Po zdefiniowaniu celu salta „wildcat” jako ilości wykonanych w locie obrotów, hierarchicznie wybrano poszczególne zmienne wpływające na zadany rezultat, uwarunkowane zależnościami fizycznymi. Następnie do przygotowania modelu predykcyjnego skorzystano z modelu punktowego COM2 oraz modelu elipsoidy bezwładności zbudowanej na osiach głównych. Użycie tego drugiego modelu jest nowatorską częścią pracy, gdyż do tej pory został zastosowany do opisu kinematyki i kinetyki ruchów złożonych jedynie dwa razy – przez Luciano Allegretti’ego Mercadante w analizie skoku w dal z miejsca (za (Zatsiorsky 1998) i w technice kopnięcia w capoeira (Mercadante 2000) oraz w modelowaniu salta w tył roboty (Park G., Park J.H. 2012). Pozwolił na opisanie ruchów obrotowych bez nadmiarowości informacji związanych z położeniem wszystkich segmentów ciała w poszczególnych chwilach czasowych. Interpretacji dokonano na podstawie zmieniającego się sumarycznego momentu bezwładności.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Ostatecznie stworzono stosunkowo prosty model do wskazania wartości zmiennych brzegowych niezbędnych do wykonania przez zawodnika podwójnego salta „wildcat” przy wykorzystaniu konkretnej geometrii rampy (takiej jak podczas badań). Zmienne wynikały z przygotowanego modelu deterministycznego i były to: wartość wypadkowego wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu, kąt wektora prędkości COM2 na początku fazy lotu (w stosunku do poziomu), kąt osi ciała zawodnika na początku fazy lotu (w stosunku do pionu), czas trwania fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, moment pędu zawodnika nadany w trakcie fazy odbicia. Wskazano zakres „bezpiecznego lądowania”, na którego podstawie interpretowano wynik wyliczonego kąta końcowego osi ciała zawodnika. Prostota modelu ma swoje uzasadnienie. Ma on służyć w pierwszej kolejności dokładnemu poznaniu analizowanego ruchu oraz zrozumienia jego specyfiki w oparciu o istotne wielkości fizyczne. Następnie ma zostać wykorzystany w praktyce, czyli jako użyteczne uzupełnienie zasobów technologicznych dla trenerów snowboardu. Modele związane z ruchem człowieka mają swoją reprezentację w literaturze. W większości to złożone konstrukty zbudowane na wielu elementach. Znajdziemy np. model pomocny w kontroli wykonania podwójnego salta w pozycji prostej bez obrotów wokół osi długiej ciała (Yeadon, Mikulcik 1996). Autorzy tłumaczą zjawisko obrotów wokół osi głównych, podkreślając iż obroty wokół osi głównej o największym i najmniejszym momencie bezwładności są stabilne, natomiast wokół osi o pośrednim momencie bezwładności są niestabilne i może dochodzić do ruchów precesyjnych osi obrotu. Inny model stworzono na podstawie zachowania zawodnika w skokach na ścieżce (Yeadon, King 2002). Po zarejestrowaniu dwóch prób salta pojedynczego w pozycji prostej oraz trzech prób salta podwójnego w pozycji prostej opracowano symulację odbicia rzeczywistego oraz z optymalnymi rozwiązaniami dla uzyskania maksymalnej wysokości skoku. Do oceny poprawności działania modelu porównano między innymi wartości nadanego w fazie odbicia pędu i momentu pędu dla układu rzeczywistego i modelowego. Opracowano również model do wskazania maksymalnej ilości możliwych do wykonania obrotów w drugim saltie podwójnego salta na trampolinie (Yeadon, Hiley 2017). Uwzględniono asymetryczne ruchy ramion i bioder oraz pozycję ciała w saltie (łamana, prosta).

Powstały w rozprawie model również został zwalidowany (na podstawie rzeczywistych prób podwójnego salta „wildcat”). Weryfikacja przebiegła w postaci trzech części, tj. wprowadzono dane empiryczne otrzymane z uśrednionego przebiegu salt podwójnych do programu dla strategii „U” oraz dla strategii „V” w celu weryfikacji modelowego kąta osi ciała przy lądowaniu z wynikiem rzeczywistym, porównano zestawy zmiennych brzegowych

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

z danych empirycznych otrzymanych z uśrednionego przebiegu salt podwójnych z danymi wprowadzanymi do modelowania, warunkującymi wykonanie podwójnego salta zgodnie z modelowym wynikiem końcowym, wprowadzono dane empiryczne wybranych poszczególnych prób salt podwójnych do programu dla strategii "U" oraz dla strategii "V" w celu weryfikacji modelowego kąta osi ciała przy lądowaniu z wynikiem rzeczywistym danej próby. W modelowaniu zgodnie ze strategią „U” model wskazał wykonanie podwójnego salta „wildcat” po wprowadzeniu wartości średnich danych empirycznych z uwzględnieniem rzeczywistego czasu trwania utrzymania zgrupowanej pozycji ciała. Różnica wyników wynosiła  $11.78^\circ$ , co stanowi 1,8%. Natomiast wynik uzyskany z modelowania według strategii „V” nie mieścił się w granicach „bezpiecznego lądowania”, wskazując na brak wykonania podwójnego salta przy zadanych wartościach początkowych. Najprawdopodobniej jest to związane z odmienną charakterystyką zmian sumarycznego momentu bezwładności tej strategii, a dokładniej z brakiem fazy utrzymania zgrupowanej pozycji. Struktura ruchu w uśrednionym przebiegu podwójnych salt odpowiadała strategii „U”. Zestawiając wyniki rzeczywiste z wynikami zamodelowanych salt podwójnych dla modelu strategii „U” poszczególne zmienne różniły się od 4% do 16.24%, zaś w modelu strategii „V” od 1.5% do 98%. Ponieważ wykonanie salta podwójnego jest efektem wypadkowego działania wszystkich zmiennych brzegowych, oceniono iż od zbioru empirycznego sumarycznie najmniej różnił się zestaw modelowy dla wariantu 10U. Średnia różnica całego zbioru wartości brzegowych wynosiła 9.71%. Na tym etapie uznano, że strategia „U” powinna służyć wykonywaniu salt wielokrotnych. Dlatego też tylko do tego modelu wprowadzono dane z przykładowych prób z pomiarów podwójnego salta. Zauważono, że wszystkie wyniki modelowe prezentują mniejszy kąt niż ten wynikający z danych rzeczywistych. Okazało się, że nie wystarczy wprost przejść od salt jednokrotnych do wielokrotnych, gdyż zachowanie człowieka zmienia się w locie ze względu na modyfikację fazy grupowania pozycji, polegającą na tym, że zawodnik osiąga jeszcze mniejszy moment bezwładności, co wpływa na osiągnięcie większej wartości prędkości kątowej. W pojedynczych saltach średnio w fazie grupowania pozycji / otwierania pozycji prędkość była mniejsza względem prędkości modelowej o około 3%, zaś w fazie utrzymania zgrupowanej pozycji o około 10%. Postanowiono wprowadzić poprawkę do modelu, uwzględniając te informacje. Dodano możliwość „ręcznego” wprowadzania wartości prędkości kątowych (powiększonych o wyliczony procent w stosunku do tych widocznych z uśrednionej charakterystyki salta pojedynczego). W praktycznym zastosowaniu wybór wersji modelu powinien zależeć od stopnia zaawansowania zawodnika.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Proponuje się, aby dla snowboardzistów uczących się podwójnego salta stosować pierwszą wersję modelu, gdyż prawdopodobne zachowanie zawodnika w locie będzie zbliżone do tego prezentowanego podczas salt pojedynczych. Zatem realizację salt podwójnych rozpocznie się przy wyższych wartościach zmiennych brzegowych. Natomiast po wstępnym poznaniu ruchu i świadomości zmian konfiguracji ciała w locie można zastosować zmodyfikowaną wersję modelu, gdzie zawodnik przy umiejętności większego zgrupowania pozycji ciała będzie mógł zmniejszyć wartości zmiennych początkowych.

Zrealizowano wszystkie zakładane etapy realizacji pracy, co pozwoliło na opisanie struktury kinematycznej fazy lotu, ocenę zmienności tego ruchu, zaprojektowanie i wykonanie modelu z uwzględnieniem cech ruchu liniowego i obrotowego układu zawodnik-set snowboardowy, określenie warunków brzegowych wykonania salta podwójnego oraz walidację modelu. Jako efekt pracy powstała użytkowa aplikacja, która może znaleźć zastosowanie wśród szkoleniowców w procesie planowania treningu i poszukiwania możliwości dalszego rozwoju umiejętności zawodnika w bezpiecznych warunkach.

## STRESZCZENIE

Snowboard jest stosunkowo młodą dyscypliną, gdyż początki zjazdów na desce po śniegu sięgają lat 60' ubiegłego wieku. Pojawił się jako młodzieżowa opozycja wobec tradycyjnego i popularnego narciarstwa. W zaledwie 17 lat od pierwszego konkursu snowboardowego został dodany do programu zimowych igrzysk olimpijskich, co świadczy o jego randze wynikającej z dynamicznego rozwoju dyscypliny. Wysoki poziom zaawansowania związany jest już nie tylko z umiejętnością jazdy na desce, ale również z wykonywaniem ewolucji w powietrzu w postaci skoków, tzw. „tricków”. Rozwój ten związany jest z odpowiednim procesem nauczania, choć niektóre poradniki zachęcają wręcz do eksperymentowania i „luźnego” podejścia, tłumacząc to jako elementy „freestyle”. Zatem wiele dowolności w snowboardzie wiąże się z przypadkowością w poszerzaniu zasobu swoich umiejętności ruchowych w „zabawie z deską”.

Bazując na doświadczeniach w innych dyscyplinach sportowych, należy wskazać że kontrolowany sposób nauczania ruchu i nabywania nowych umiejętności wydaje się być bardziej efektywnym, trwałym oraz przede wszystkim bezpiecznym dla osoby trenującej. Do ukierunkowania procesu treningowego potrzeba poznania ruchu, którego nauczamy oraz zdefiniowania jego celu wraz z określeniem co na ten cel wpływa. Obecnie nowoczesne rozwiązania techniczne i specjalistyczna aparatura pomiarowa umożliwiają zebranie niezbędnych informacji o zewnętrznej i wewnętrznej strukturze ruchu, opisującą technikę. Dzięki ich zastosowaniu można w pełni zrozumieć wykonywaną czynność motoryczną oraz wskazać, które czynniki są istotne w realizacji zadania ruchowego, wpływając na uzyskanie oczekiwanego efektu końcowego. Wyodrębnia się je poprzez poszukiwanie funkcyjnych zależności między zmiennymi ruchu a wielkością celową. Taka koncepcja jest podstawą do stworzenia deterministycznego modelu analizy jakościowej ruchu. Model ten może stanowić punkt wyjścia i teoretyczną podstawę do badań biomechanicznych w sportach, pomagając w ten sposób wyjaśnić, zamiast jedynie opisywać mechaniczne aspekty wyników sportowych. Został wykorzystany m.in. w pływaniu, lekkiej atletyce czy gimnastyce, pomagając w osiągnięciu coraz to lepszych wyników sportowych.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Uzasadnieniem podjętej tematyki rozprawy doktorskiej jest niedostatek fachowej literatury opisującej strukturę ruchu trików snowboardowych oraz brak analiz w zakresie oceny wpływu zmiennych mechanicznych na wykonanie danego triku. Dostępne publikacje skupiają się głównie na lądowaniu, pomijając istotną dla wykonania danego zadania (triku) fazę lotu.

Głównym celem pracy jest opracowanie i walidacja matematycznego modelu fazy lotu w snowboardowym saltcie „wildcat”, który jest saltem w tył typu sideflip, czyli saltem w którym obrót wykonywany jest „bokiem”, tj, w anatomicznej płaszczyźnie czołowej zawodnika. Przyjęto następujące etapy realizacji pracy:

- 1) opisanie struktury kinematycznej fazy lotu w pojedynczym saltcie „wildcat”;
- 2) identyfikacja zmienności ruchów w fazie lotu w pojedynczym saltcie „wildcat”;
- 3) opracowanie modelu fazy lotu pojedynczego salta „wildcat” przy użyciu modelu punktowego i modelu elipsoidy bezwładności ciała z uwzględnieniem zmienności ruchów i warunków początkowych;
- 4) określenie warunków wykonania fazy lotu w podwójnym saltcie „wildcat” na podstawie modelu;
- 5) walidacja modelu poprzez porównanie uzyskanych w fazie lotu wyników podwójnego salta „wildcat” z wynikami empirycznymi.

W pierwszym etapie opisano fazową strukturę lotu w triku „wildcat”, wskazując trzy kryteria podziału lotu na fazy z uwagi na fakt występowania trzech rodzajów ruchu w tym triku, czyli ruchu postępowego i obrotowego ciała (w globalnym układzie odniesienia) przy jednoczesnej zmianie pozycji poszczególnych części ciała (w lokalnym układzie odniesienia). Wybrano położenie środka masy układu (tj. ciało zawodnika + set snowboardowy) w osi pionowej, pierwszy niezmiennik tensora bezwładności (tj. sumaryczny moment bezwładności ciała lub równoważnie sumaryczny moment bezwładności elipsoidy bezwładności) oraz położenie osi ciała zawodnika w płaszczyźnie lotu. Podczas tworzenia opisu zidentyfikowano dwie strategie realizacji salta „wildcat”, które z uwagi na kształt charakterystyki czasowej sumarycznego momentu bezwładności nazwano jako „U” i „V”.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

W drugim etapie określono poziom zmienności w pojedynczym salcie „wildcat”. Skupiono się na analizie: badanego, tj. porównania wykonania zadania przez poszczególnych zawodników oraz średniej całej grupy; momentu realizacji ruchu, tj. porównaniu chwil czasowych na granicach faz lotu oraz w całej fazie lotu; typu zmiennej, tj. porównaniu zmiennych charakteryzujących lot w trzech rodzajach ruchu występujących w salcie „wildcat”. Ponadto uwzględniono identyfikację zmienności w obrębie dwóch strategii wykonania salta, tj. „U” i „V”. Zastosowano klasyczny współczynnik zmienności (CV) oraz biologiczny współczynnik zmienności (BCV).

W trzecim etapie określono zmienne wpływające na zadany w salcie „wildcat” rezultat, tworząc tzw. model deterministyczny ruchu. Opracowano model fazy lotu na podstawie modelu punktowego i modelu elipsoidy bezwładności zbudowanej na osiach głównych. Wskazano przyjęte założenia modelu oraz opisano przebieg modelowania w stworzonej do tego aplikacji.

W czwartym etapie rozpoczęto modelowanie podwójnego salta „wildcat”. Uzyskano takie wartości zmiennych brzegowych dzięki którym model wskazał wykonanie podwójnego salta opartego o założenia „bezpiecznego lądowania”. Wskazano poszczególne kroki modelowania, uzasadniając wybór konkretnych wartości zmiennych początkowych modelu.

W piątym etapie dokonano walidacji modelu, porównując modelowe wyniki z danymi empirycznymi uzyskanymi podczas przeprowadzenia badań. Przeprowadzono ją w trzech częściach, tj.: dane empiryczne otrzymane z uśrednionego przebiegu salt podwójnych wprowadzono do programu dla strategii „U” oraz dla strategii „V” w celu weryfikacji modelowego kąta osi ciała przy lądowaniu z wynikiem rzeczywistym; następnie porównano zestawy zmiennych brzegowych z danymi empirycznymi otrzymanymi z uśrednionego przebiegu salt podwójnych z danymi wprowadzanymi do modelowania, warunkującymi wykonanie podwójnego salta zgodnie z modelowym wynikiem końcowym; na końcu dane empiryczne wybranych poszczególnych prób salt podwójnych wprowadzono do programu dla strategii "U" oraz dla strategii "V" w celu weryfikacji modelowego kąta osi ciała przy lądowaniu z wynikiem rzeczywistym danej próby. Uzyskano potwierdzenie zasadności stosowania modelu, wskazując na jego mocne i słabe strony.



## **- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

Zrealizowano wszystkie zakładane etapy realizacji pracy, co pozwoliło na opisanie struktury kinematycznej fazy lotu, ocenę zmienności tego ruchu, zaprojektowanie i wykonanie modelu z uwzględnieniem cech ruchu liniowego i obrotowego układu zawodnik-set snowboardowy, określenie warunków brzegowych wykonania salta podwójnego oraz walidację modelu. Jako efekt pracy powstała użytkowa aplikacja, która może znaleźć zastosowanie wśród szkoleniowców w procesie planowania treningu i poszukiwania możliwości dalszego rozwoju umiejętności zawodnika w bezpiecznych warunkach.

## SUMMARY

Snowboarding is a relatively young sport, as it started in the 1960s. It originated as a youth rebellion against popular traditional skiing. In not more than twenty years since the first snowboarding tournament it has been added to the Winter Olympics programme, which clearly states its position stemming from its dynamic development. High level of snowboarding proficiency shows more than sliding down the slope and includes doing tricks after having jumped up in the air. Progressing in the above is related to a suitable learning process, even though some handbooks encourage to experiment and 'chill' in order to pursue 'freestyle'. Therefore, a lot of discretion on snowboarding results from randomness in extending one's kinaesthetic skills while 'playing with the board'.

Telling from other sports' experience it has to be said that a controlled way of kinaesthetic education and acquiring new skills is seemingly more effective, durable, and – most of all – safe for a trainee. In order to orientate training processes we need to cognize the movement we are teaching and to define the processes' aim with everything that infects it. Currently, modern technical solutions and specialized measuring tools allow us to gather all the essential information on 'external and internal movement structure' to describe technique. Thanks to applying such methods we can fully understand a kinaesthetic action being performed and point out which factors are essential in its realisation, having an impact on its final results. These factors are isolated by searching for functional relations between movement variables and aiming variable. Such a concept is a base for creating a deterministic model of qualitative movement analysis. This model may constitute a starting point and a theoretical base for biomechanical studies in sport – helping to explain, instead of just describing, mechanical aspects of sporting results. It has been used in sports, incl. swimming, athletics and gymnastics and added strongly to achieving better and better results.

The reasons behind choosing such a PhD thesis topic are a shortage of professional literature in the area of snowboarding tricks' structure description and a lack of evaluation in mechanical variables' impact on performing given tricks. Available publications focus mainly on landing, omitting the phase of flying – an important part for successful task (trick) performance.

The main aim of this thesis is devising and validating a mathematical model for the flying phase of a snowboard flip called 'Wildcat', which is a backward (sideflip) somersault performed sidewise, i.e. in competitor's anatomical frontal plane.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

The following stages have been assumed:

- 1) a description of kinematical phase of flight in a single 'Wildcat' flip;
- 2) identification of movement variability for the flying phase of a single 'Wildcat' flip;
- 3) a development of a model for the flying phase of a single 'Wildcat' flip using a point based model and ellipsoid model body inertia taking account of movement variability and starting conditions;
- 4) defining conditions for performing a double 'Wildcat' flip using the model;
- 5) validating the model by comparing empirical results to the results acquired at the flying phase of a double 'Wildcat' flip.

The first stage describes phase structure of flight while performing 'Wildcat' flip, pointing out to three criteria of phase division developed for three kinds of movement in this trick, i.e. forward progression and circular motion of the body (in a global frame of reference) whilst changing respective body parts' position (in a local frame of reference). A centre of mass position of the layout was chosen (i.e. snowboarder's body along with a snowboarding set) in a vertical axis, the first invariant of inertia tensor (i.e. aggregate inertia moment of the body or equipollent aggregate inertia moment of the inertia ellipsoid) and the position of the snowboarder's body in the plane of flight. During the making of the records two strategies of performing the 'Wildcat' flip were identified, they were called 'U' and 'V' according to the time characteristic of the aggregate inertia moment.

The second stage determined levels of variability in a single 'Wildcat' flip. Focusing on analysing the examined, i.e. comparing realization of the task by different snowboarders and the average result for the whole group; the moment of movement realisation, i.e. comparing tidal moments on the edges of flight phases and during the whole flight; the type of variable, i.e. comparing the variables for three kinds of movement for the 'Wildcat' flip. Moreover, identification of variability within the two strategies for performing the trick ('U' & 'V') was taken into account. A classical coefficient of variation (CV) and biological coefficient of variation (BCV) were used.

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

The third stage determined the variables having impact on the results set for the 'Wildcat' flip, creating a so-called deterministic model of movement. A model for the flight phase was made with use a point based model and elipsoid model body inertia built on the main axes.

In stage four we started to model a double 'Wildcat' flip. Such edging variables' values were obtained that the model indicated performing a double 'Wildcat' flip based on 'safe landing' policy. Respective steps of modeling were established validating the choice of certain model's initial variable values.

In stage five the model was validated by comparing model scores to empirical data obtained from conducting the research. The validation was held in three parts: empirical data obtained from average double flips realisation was implemented both for the 'U' and 'V' strategies to verify the model angle of body axis while landing with an effective result; next, there was a comparison of edge variable sets from the empirical data obtained from average double flips realisation with the data implemented for modelling, conditioning the realisation of a double flip in accordance with the model outcome; in the end the empirical data from specific, chosen performances of double flips were input to the 'U' & 'V' strategies programmes to verify a model angle for the body axis while landing with an actual result of such an attempt. An affirmation of the legitimacy of the model was a result, showing its strengths and weaknesses.

All of the planned stages of this work have been conducted, which allowed to describe the kinematic phase of flight, the assessment of this motion, design and produce a model regarding progressive and circular motions factors of the snowboarder – snowboarding set layout, determine the edge conditions for a double flip's realisation and validate the model. As a result we got an application which can be used by coaches in the practice planning process, and also while searching for ways to develop snowboarder's skills in safe conditions.

## BIBLIOGRAFIA

1. Aggarwal, J. K., Cai, Q. (1999). Human Motion Analysis: A Review. 73(3), 428–440. [papers2://publication/uuid/3DDE8D5A-B152-4BD6-BA24-733C219E2805](https://doi.org/10.1080/00140139910001653000).
2. Alexander, R. Mc Neill (1992). A model of bipedal locomotion on compliant legs. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 338, 189-198.
3. Alexander, R. Mc Neill (1995). Simple models of human movement. *Appl Mech Rev* 48(8), 461-470.
4. Bacik, B., Kurpas, W., Marszalek, W., Wodarski, P., Sobota, G., Starzyński, M., Gzik, M. (2020). Movement Variability during the Flight Phase in a Single Back Sideflip (Wildcat) in Snowboarding. *Journal of Human Kinetics*, 72(1), 29–38. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0006>.
5. Bartlett, R. (2007). *Introduction to Sports Biomechanics (Second Edi)*. London and New York: Routledge. <http://doi.org/10.4324/9780203462027>.
6. Bladin, C., McCrory, P., & Pogorzelski, A. (2004). Snowboarding Injuries: Current Trends and Future Directions. *Sports Medicine*, 34(2), 133–138. <https://doi.org/10.2165/00007256-200434020-00006>.
7. Blaszczyk J., Bacik B., Juras G. (2003). Clinical assessment of postural stability. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. - Vol. 3(2), s. 135-143.
8. Bradshaw, E. J., Maulder, P. S., Keogh, J. W. L. (2007). Biological movement variability during the sprint start: Performance enhancement or hindrance? *Sports Biomechanics*, 6(3), 246-260. <http://doi.org/10.1080/14763140701489660>.
9. Chen, S.-C., Hsieh, H.-J., Lu, T.-W., Tseng, C.-H. (2011). A method for estimating subject-specific body segment inertial parameters in human movement analysis. *Gait & Posture*, 33(4), 695–700. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.03.004>.
10. Chlopek Z., Piaseczny L. (2001). UWAGI O MODELOWANIU W BADANIACH  
REMARKS ABOUT THE MODELLING IN SCIENCE RESEARCHES. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 4, 47–57.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

11. Chow, J. W., Knudson, D. V. (2011). Use of deterministic models in sports and exercise biomechanics research. *Sports Biomechanics*, 10(3), 219–233. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.592212>.
12. Clark, C. C. T., Barnes, C. M., Holton, M., Summers, H. D., Stratton, G. (2016). A Kinematic Analysis of Fundamental Movement Skills. *Sport Science Review*, 25(3–4), 261–275. <https://doi.org/10.1515/ssr-2016-0014>.
13. Clark, J. E., Phillips, S. J. (1993). A Longitudinal Study of Intralimb Coordination in the First Year of Independent Walking: A Dynamical Systems Analysis. *Child Development*, 22 64(4), 1143–1157. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1993.tb04192.x>.
14. Clifford, A. M., Holder-Powell, H. (2010). Postural control in healthy individuals. *Clinical Biomechanics*, 25(6), 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.03.005>.
15. Damavandi, M., Barbier, F., Leboucher, J., Farahpour, N., Allard, P. (2009). Effect of the calculation methods on body moment of inertia estimations in individuals of different morphology. *Medical Engineering and Physics*, 31(7), 880–886. <http://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.03.008>.
16. Davis, R. B., Ounpuu, S., Tyburski, D., Gage, J. R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10, 575–587.
17. Delorme, S., Tavoularis, S., Lamontagne, M. (2005). Kinematics of the Ankle Joint Complex in Snowboarding. *Journal of Applied Biomechanics*, 21(4), 394–403. <https://doi.org/10.1123/jab.21.4.394>.
18. Donski, D. D. (1963). *Biomechanika ćwiczeń fizycznych*. Sport i Turystyka.
19. Ellison, M. W. (2010). *SKI AND SNOWBOARD EQUIPMENT SYSTEM*. 2(12).
20. Erdmann, W. S. (1999). Geometry and inertia of the human body - review of research. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*.
21. Glazier, P. S., Robins, M. T. (2012). Comment on “Use of deterministic models in sports and exercise biomechanics research” by Chow and Knudson (2011). *Sports Biomechanics*, 11(1), 120–122. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.650189>.
22. Gruber, K., Ruder, H., Denoth, J., Schneider, K. (1998). A comparative study of impact dynamics: wobbling mass model versus rigid body models. *Journal of Biomechanics*, 31(5), 439–444. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(98\)00033-5](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(98)00033-5).

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

23. FIG. (2010). CODE OF POINTS, Trampoline Gymnastics. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE GYMNASTIQUE.
24. FIG. (2013). CODE OF POINTS, Trampoline Gymnastics. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE GYMNASTIQUE.
25. FIG. (2017). CODE OF POINTS, Trampoline Gymnastics. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE GYMNASTIQUE
26. FIS. (2016). Judges Manual Snowboard. Oberhofen: FEDERATION INTERNATIONALE DE SKI.
27. FIS. (2019). JUDGES HANDBOOK SNOWBOARD & FREESKI. Zurich: FEDERATION INTERNATIONALE DE SKI.
28. Haake, S. J. (2009). The impact of technology on sporting performance in Olympic sports. *Journal of Sports Sciences*, 27(13), 1421–1431. <https://doi.org/10.1080/02640410903062019>.
29. Ham, D. J., Knez, W. L., Young, W. B. (2007). A DETERMINISTIC MODEL OF THE VERTICAL JUMP: IMPLICATIONS FOR TRAINING. *Strength And Conditioning*, 21(3), 967–972.
30. Hasler, R. M., Berov, S., Benneker, L., Dubler, S., Spycher, J., Heim, D., Zimmermann, H., Exadaktylos, A. K. (2010). Are there risk factors for snowboard injuries? A case-control multicentre study of 559 snowboarders. *British Journal of Sports Medicine*, 44(11), 816-821. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.071357>.
31. Hay, J. G. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques* (fourth). New Jersey: Prentice Hall.
32. Hay, J. G., Yu, B. (1995). Critical characteristics of technique in throwing the discus. *Journal of Sports Sciences*, 13, 125-140 <https://doi.org/10.1080/02640419508732220>.
33. Hedrick, T. L. (2008). Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems. *Bioinspiration and Biomimetics*, 3(3). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/3/3/034001>.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

34. Heino, R. (2000). What Is So Punk About Snowboarding? *Clinical Social Work Journal*, 35(3), 151–153. <https://doi.org/Doi.10.1177/0002764213490695>.
35. Hu, W., Hu, M., Zhou, X., Tan, T., Lou, J., Maybank, S. (2006). Principal axis-based correspondence between multiple cameras for people tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(4), 663–671. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.80>.
36. Hubbard, M. (1993). COMPUTER SIMULATION. *Journal of Biomechanics*, 26, 53-61.
37. Iwamoto, M., Kisanuki, Y., Watanabe, I., Furusu, K., Miki, K. (2002). DEVELOPMENT OF A FINITE ELEMENT MODEL OF THE TOTAL HUMAN MODEL FOR. *International Research Council on Biomechanics of Injury*, 12.
38. Jones, P. E. (2012). *The Mechanics of Takeoffs in the Aerials Event of Freestyle Skiing*. Loughborough University.
39. Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E. (1990). Measurement of Lower Extremity Kinematics During Level Walking. *Classic Papers in Orthopaedics*, 397–398. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8\\_100](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8_100).
40. Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Gainey, J., Gorton, G., Cochran, G. V. B. (1989). Repeatability of Kinematic, Kinetic, and Electromyographic Data in Normal Adult Gait. *Classic Papers in Orthopaedics*, 399–401. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8\\_101](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8_101).
41. Kiers, H., Van Dieën, J., Dekkers, H., Wittink, H., Vanhees, L. (2013). A Systematic Review of the Relationship between Physical Activities in Sports or Daily Life and Postural Sway in Upright Stance. *Sports Medicine*, 43(11), 1171–1189. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0082-5>.
42. Klous, M., Müller, E., Schwameder, H. (2014). Three-Dimensional Lower Extremity Joint Loading in a Carved Ski and Snowboard Turn: A Pilot Study. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/340272>.
43. Knudson, D. (2007). The Fundamentals of Biomechanics. In *Biomechanics of Human Motion*. <https://doi.org/10.1201/b22446-8>.



**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

44. Krol, H. (2003). Kryteria doboru i oceny cwiczen doskonalacych technike sportowa. AWF Katowice. ISBN 83-87478-52-0.
45. Krol, H. (2016). Biomechaniczne aspekty cwiczen doskonalacych technike sportowa. AWF Katowice. ISBN 978-83-64036-59-0.
46. Krol, H., Mynarski, W. (2005). Cechy ruchu - charakterystyka i mozliwosci parametryzacji. AWF Katowice. ISBN 1230-4646.
47. Krol, H., Klyszcz-Morciniak, M., Sobota, G., Nowak, K. (2016). The complex analysis of movement in the evaluation of the backward somersault performance. *Physical Activity Review*, 4, 28-39.
48. Kurpiers, Nico, McAlpine, P., Kersting, U. G. (2017). Predictors of falls in recreational snowboard jumping: An observational study. *Injury*, 48(11), 2457–2460. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.08.052>.
49. Kurpiers, Nicolas, McAlpine, P. R., Kersting, U. G. (2009). Perspectives for comprehensive biomechanical analyses in mogul skiing. *Research in Sports Medicine*, 17(4), 231–244. <https://doi.org/10.1080/15438620903321037>.
50. Latash, M. L., Scholz, J. P., Danion, F., Schoner, G. (2002). Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor: *Exercise and Sport Sciences Reviews*.
51. Lees, A. (2002). Technique analysis in sports: A critical review. *Journal of Sports Sciences*, 20(10), 813–828. <https://doi.org/10.1080/026404102320675657>.
52. MacKinnon, C. D., Winter, D. A. (1993). Control of whole body balance in the frontal plane during human walking. *Journal of Biomechanics*, 26(6), 633–644. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(93\)90027-C](https://doi.org/10.1016/0021-9290(93)90027-C).
53. Made, C., Elmqvist, L. G. (2004). A 10-year study of snowboard injuries in Lapland Sweden. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 14(2), 128–133. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2003.00342.x>.
54. Marciniak, M. (2007). *Snowboard*. Pascal. ISBN 978-83-7513-091-1.
55. McAlpine, P., Kersting, U. (2006). DEVELOPMENT OF A FIELD TESTING PROTOCOL FOR THE BIOMECHANICAL ANALYSIS OF SNOWBOARD JUMP LANDINGS – A PILOT STUDY. *Analysis*, July, 11–14. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/232>.
56. McAlpine, P., Kurpiers, N., Kersting, U., Determan, J., Borrani, F. (2012). BIOMECHANICAL ANALYSES OF SNOWBOARD JUMP LANDINGS. 105–108.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

57. McConville, J. T., Churchill, T. D., Kaleps, I., Clauser, C. E., Cuzzi, J. (1980). Anthropometric relationships of body and body segments of inertia.
58. McGeer, T., (1990). Passive Dynamic Walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), 62-82.
59. Mercadante, L. A. (2000). ORIENTAÇÃO DO CORPO HUMANO COMO UM TODO A PARTIR DO SEU ELIPSÓIDE CENTRAL DE ORIENTADOR. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS São Paulo.
60. Mkaouer, B., Jemni, M., Amara, S., Chaabène, H., Padulo, J., Tabka, Z. (2014). Effect of Three Technical Arms Swings on The Elevation of the Center of Mass During a Standing Back Somersault. *Journal of Human Kinetics*, 40(March), 37–48. <https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0005>.
61. Mkaouer, B., Jemni, M., Amara, S., Chaabène, H., Tabka, Z. (2013). Kinematic and Kinetic Analysis of Two Gymnastics Acrobatic Series to Performing the Backward Stretched Somersault. *Journal of Human Kinetics*, 37(1), 17–26. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0021>.
62. Müller, B., Wolf, P., Brueggemann, G. P., Deng, Z., McIntosh, A., Miller, F., (eds.), S. W. s. (2017). *Handbook of Human Motion*. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-30808-1>.
63. Nedergaard, N. J., Heinen, F., Sloth, S., Holmberg, H. Ch., Kersting, U. G. (2015). Biomechanics of the ski cross start indoors on a customised training ramp and outdoors on snow. *Sports Biomechanics*, 14(3), 273–286. <https://doi.org/10.1080/14763141.2015.1052543>.
64. Pain, M. T. G., Challis, J. H. (2004). Wobbling Mass Influence on Impact Ground Reaction Forces: A Simulation Model Sensitivity Analysis. *Journal of Applied Biomechanics*, 20(3), 309–316. <https://doi.org/10.1123/jab.20.3.309>.
65. Park, G., Park, J. H. (2012). Backflips Performed by Humanoid Robots Based on Extended Linear Inverted Pendulum Mode. *IFAC Proceedings Volumes (Vol. 45)*. IFAC. <http://doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00021>.
66. Park, S., Ahn, S., Kim, J., Shin, I., Choi, E., Kim, Y. (2015). Kinematic Study of Lower Extremity Movements in Unskilled and Expert Snowboarders During Snowboard Simulator Exercises. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 36(4), 109–114. <https://doi.org/10.9718/jber.2015.36.4.109>.

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

67. Pearsall, D. J., Reid, J. G. (1994). The study of human body segment parameters in 24 biomechanics. An historical review and current status report. *Sports Medicine*, 18(2), 126–140.
68. Pino, E. C., Colville, M. R. (1989). Snowboard injuries. 778–781.
69. Prassas, S., Kwon, Y.-H., Sands, W. A. (2006). Biomechanical research in artistic gymnastics: a review. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports*, 5(2), 261–291. <https://doi.org/10.1080/14763140608522878>.
70. Prassas, S., Sanders, R. (1999). BIOMECHANICAL RESEARCH IN GYMNASTICS: WHAT IS DONE, WHAT IS NEEDED. ISBS '99 : XVII International Symposium on Biomechanics in Sports, June 30-July 6, 1999, Edith Cowan University, Perth, Western Australia: Acrobatics, 1999. <https://ro.ecu.edu.au/ecuworks/7129>.
71. Rasmussen, J., Vondrak, V., Damsgaard, M., and Zee, M. D., Dostal, Z. (2011). Biomechanics of Man 2002. *Procedia IUTAM*, 2, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2011.04.018>.
72. Rasmussen, J. (2002). The anybody project – computer analysis of the human body 1. *The Czech Society of Biomechanics*, 2, 270-274.
73. Reinbolt, J. A., Seth, A., Delp, S. L. (2011). Simulation of human movement: Applications using OpenSim. *Procedia IUTAM*, 2, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2011.04.019>.
74. Rocha, L., Velho, L., Carvalho, P. C. P. (2004). Motion reconstruction using moments analysis. In *Brazilian Symposium of Computer Graphic and Image Processing* (pp. 354–361). <http://doi.org/10.1109/SIBGRA.2004.1352981>.
75. Slomka, K., Juras, G., Sobota, G., Bacik, B. (2013). The reliability of a rambling-trembling analysis of center of pressure measures. *Gait and Posture*, 37(2), 210-213.
76. Stergiou, N., Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, 30(5), 869–888. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>.
77. Stergiou, N., Harbourne, R. T., Cavanaugh, J. T. (2006). Optimal Movement Variability: A New Theoretical Perspective for Neurologic Physical Therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 30(3), 120–129. <https://doi.org/10.1097/01.npt.0000281949.48193.d9>.

78. Summers, J. J., Anson, J. G. (2009). Current status of the motor program: Revisited. *Human Movement Science*, 28(5), 566–577. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2009.01.002>.
79. Takei, Y. (2007). The Roche Vault Performed by Elite Gymnasts: Somersaulting Technique, Deterministic Model, and Judges' Scores. *Journal of Applied Biomechanics*, 23(1), 1–11. <https://doi.org/10.1123/jab.23.1.1>.
80. Theriault, D. H., Fuller, N. W., Jackson, B. E., Bluhm, E., Evangelista, D., Wu, Z., Betke, M., Hedrick, T. L. (2014). A protocol and calibration method for accurate multi-camera field videography. *Journal of Experimental Biology*, 217(11), 1843–1848. <https://doi.org/10.1242/jeb.100529>.
81. Usherwood, J. R., Hubel, T. Y., Smith, B. J. H., Self Davies, Z.T., Sobota, G. (2009). The scaling or ontogeny of human gait kinetics and walk-run transition : the implications of work v.s peak power minimization. *OURNAL OF BIOMECHANICS* 81, 12-21. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.09.004>.
82. Vatavu, R. D., Pentiu, Ș., Chaillou, C., Grisoni, L., Degrande, S. (2006). Visual Recognition of Hand Postures. In 8th International Conference on DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS.
83. Vicon, M. S. (2015). Nexus Advanced Gait Workflow Guide. February, 1–28.
84. Yeadon, M. R., Hiley, M. J. (2017). Twist limits for late twisting double somersaults on trampoline. *Journal of Biomechanics*, 58, 174–178. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.05.002>.
85. Yeadon, M. R., King, M. a. (2002). Evaluation of a torque driven simulation model of tumbling. *Journal of Applied Biomechanics*, 18, 195–206. Retrieved from <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/>.
86. Yeadon, M. R., Mikulcik, E. C. (1996). The control of non-twisting somersaults using configuration changes. *Journal of Biomechanics*, 29(10), 1341–1348. [http://doi.org/10.1016/0021-9290\(96\)00034-6](http://doi.org/10.1016/0021-9290(96)00034-6).

**- ROZPRAWA DOKTORSKA -**

87. Zatsiorsky, V. M. M. (1998). Kinematics of Human Motion. Human Kinetics (10th ed.). Human Kinetics. <http://doi.org/99.1998/zatsiorsky.0880116765>.
88. Zygmuntowicz, M., Czerwinski, E. (2007). The Causes of Injuries in Freestyle Snowboarding. *Medicina Sportiva*, 11(4), 102–104. <https://doi.org/10.2478/v10036-007-0019-x>.

## NETOGRAFIA

<https://www.snowboarder.com/grab-directory/> ,

*dostęp z dnia 03.01.2022r.*

<http://www.wicklowmontessoriprimaryschoolcoders.me/coders2/charlie/index.html> ,

*dostęp z dnia 03.01.2022r.*

<https://www.youtube.com/watch?v=hQkRqymwudI> ,

*dostęp z dnia 03.01.2022r.*

## SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Częstość upadków podczas lądowania w zależności od ustawienia osi deski w stosunku do kierunku jazdy (Kurpiers, McAlpine, Kersting 2017).....	8
Rysunek 2. Rodzaje skoczni snowboardowych (Marciniak 2007).....	9
Rysunek 3. Rodzaje chwytów deski w snowboardzie dla dwóch typów snowboardzistów, wskazanych w dalszej części pracy ( <a href="https://www.snowboarder.com/grab-directory/">https://www.snowboarder.com/grab-directory/</a> ). ....	10
Rysunek 4. Geometria salta „wildcat” ( <a href="http://www.wicklwmontessoriprimaryschoolcoders.me/coders2/charlie/index.html">http://www.wicklwmontessoriprimaryschoolcoders.me/coders2/charlie/index.html</a> ). ....	12
Rysunek 5. Odnośnik w postaci kodu QR do materiału filmowego przedstawiającego wykonanie skoku „wildcat” na stoku ( <a href="https://www.youtube.com/watch?v=hQkRqymwudI">https://www.youtube.com/watch?v=hQkRqymwudI</a> ). ....	12
Rysunek 6. Wskazówki dotyczące stosowania potrąceń punktowych za ustawienie kończyn górnych obowiązujące do roku 2013 (FIG 2010).....	15
Rysunek 7. Dopuszczalne położenie kończyn górnych względem tułowia służące do wyhamowania obrotów w zakończonym elemencie. Obowiązuje od 2013 roku (FIG 2013)..	15
Rysunek 8. Wskazówki dotyczące stosowania potrąceń punktowych za ustawienie głowy obowiązujące do roku 2013 (FIG 2010).....	16
Rysunek 9. Model fazowej struktury ruchu (Król, Mynarski 2005). ....	18
Rysunek 10. Struktura i forma modelu deterministycznego (Less 2002).....	22
Rysunek 11. Model sprintu na 100m wraz z ilustracją wybranych charakterystyk kinematycznych kroku biegowego (Chow, Knudson 2011).....	23
Rysunek 12. Model rzutu dyskiem zaadaptowany przez Chow, Knudson (2011) z modelu Hay, Yu (1995). ....	23
Rysunek 13. Rampy zjazdowe w „Freestyle Park” – widok z góry. Rejestracji trików dokonywano na największej, tj. środkowej rampie (oznaczonej strzałką). ....	28
Rysunek 14. Rampy zjazdowe w „Freestyle Park” – widok z boku.....	28
Rysunek 15. Widoczne pole lądowania w postaci „dołu” wypełnionego gąbkami.....	29
Rysunek 16. Specjalnie przygotowana deska snowboardowa z zamontowanymi kółkami. ....	29
Rysunek 17. Rozmieszczenie kamer systemu optoelektronicznego na kratownicy (widoczne 3 kamery ‘Bonita’). ....	30
Rysunek 18. Widok stanowiska pomiarowego. Na pierwszym planie krawędź rampy z markerami, kratownica z kamerami ‘Bonita’ oraz jedna z kamer systemu video (widoczna po lewej stronie zdjęcia). ....	31

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Rysunek 19. Rozmieszczenie markerów według protokołu Plug-in-Gate (Clark et al. 2016).	31
Rysunek 20. Rozmieszczenie markerów na badanym zawodniku i siecie snowboardowym....	33
Rysunek 21. Odnośniki do materiału filmowego w postaci kodów QR do przykładowych salt „wildcat” zarejestrowanych podczas badań.....	33
Rysunek 22. Poglądowy schemat modelowania wykorzystywany w systemie Vicon.....	34
Rysunek 23. Przykładowe zobrazowanie badanego w systemie Vicon (Vicon Motion Systems , User Guide, 2015).....	35
Rysunek 24. Wizualizacja badanego w systemie Vicon w oprogramowaniu Nexus (dane z pomiaru). Widoczne markery na rampie, badanym, desce snowboardowej oraz lokalizacja kamer (nr 2, nr 3 i nr 7).....	36
Rysunek 25. Odnośniki do materiałów filmowych w postaci kodów QR zawierających wykonanie salta pojedynczego (A) oraz podwójnego (B) widoczne w systemie Vicon oprogramowania Nexus w zwolnionym tempie. ....	36
Rysunek 26. Trajektorie wybranych punktów widoczne z 4 kamer. Etap obróbki danych video w skrypcie MATLAB. ....	37
Rysunek 27. Schematyczny podział lotu na fazy w triku snowboardowym „wildcat”. Wskazano początek i koniec lotu (białe romby), granice faz ze względu na: wysokość COM2 (czarny romb), stopień zgrupowania pozycji (czerwone romby) i kąt obrotu osi ciała (niebieskie romby). Dodatkowo widoczna jest trajektoria COM2 (zielone kółeczka) oraz oś ciała (niebieski odcinek) stworzona pomiędzy COM2 i środkiem obręczy barkowej (czerwone kółeczka). Ponadto zamieszczono kinogramy odzwierciedlające pozycję ciała zawodnika na granicach faz. ....	42
Rysunek 28. Numeracja „ćwiartek” obrotu w locie wyznaczonych na podstawie położenia osi ciała zawodnika względem pionu. ....	43
Rysunek 29. Fazowa struktura lotu w triku snowboardowym „wildcat” na podstawie uśrednionego przebiegu (wąsy wskazują odchylenie standardowe w poszczególnej chwili czasowej). Granice faz oznaczono rombami. Strzałki wskazują wartości poszczególnych kryteriów podziału ruchu, pokazując zakończenie/rozpoczęcie poszczególnych faz lotu. ....	44
Rysunek 30. Uśredniona charakterystyka głównych znormalizowanych momentów bezwładności. Odchylenia standardowe zaznaczono w postaci „wąsów”. ....	48
Rysunek 31. Przykładowa charakterystyka czasowa głównych momentów bezwładności względem osi głównych uwzględniająca występowanie zjawiska bifurkacji. ....	49



## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Rysunek 32. Dwie charakterystyki czasowe sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności rozróżnione ze względu na swój kształt nazwane strategiami wykonania salta jako „U” i „V”.....	49
Rysunek 33. Porównanie struktury faz lotu w przypadku dwóch strategii wykonania salta - „U” (27 salt) i „V” (18 salt) na podstawie uśrednionych przebiegów. ....	51
Rysunek 34. Prędkości COM2 w ruchu postępowym w osi pionowej (z) oraz w osi poziomej w płaszczyźnie lotu (y). ....	54
Rysunek 35. Prędkości obrotowe elipsoidy bezwładności wokół osi głównych w strategii „U” i „V”. Oś 1 to oś względem której występował maksymalny moment bezwładności ( $I_{MAX}$ ), oś 2 – pośredni ( $I_{MED}$ ), oś 3 – minimalny ( $I_{MIN}$ ). Cienka linia przedstawia uśrednioną charakterystykę czasową prędkości a gruba charakterystykę wygładzoną wielomianem 6 stopnia. ....	56
Rysunek 36. Główne momenty bezwładności względem osi głównych podczas triku „wildcat” wykonywanego zgodnie ze strategiami „U” i „V”. ....	57
Rysunek 37. Uśrednione przebiegi energii (kinetycznej, potencjalnej, kinetycznej ruchu obrotowego) w strategii „U” i „V”. ....	57
Rysunek 38. Wkład poszczególnych elementów układu ciała zawodnik + set snowboardowy w wartość sumarycznego momentu bezwładności dla strategii „U” (po lewej) i strategii „V” (po prawej). ....	58
Rysunek 39. Korelacje momentów bezwładności poszczególnych członów układu względem sumarycznego momentu bezwładności (część A) oraz wzajemnie względem siebie (część B). W części B im ciemniejsze pole tym większa korelacja przebiegów momentów bezwładności. Dla strategii „V” występowały także korelacje ujemne. ....	59
Rysunek 40. Przebiegi momentów bezwładności stóp (T – tylna, P - przednia) względem środka masy układu w locie podczas triku „wildcat”. Po stronie lewej strategia „U”, po prawej stronie „V”. ....	60
Rysunek 41. Współczynnik zmienności dla wszystkich parametrów pomiędzy badanymi oraz zmiennością dla całej grupy (istotne różnice na poziomie $p < 0.05$ oznaczono „**”) (Bacik et al. 2020). ....	62
Rysunek 42. Współczynnik zmienności parametrów kinematycznych lotu na granicach faz oraz w poszczególnych fazach (istotne różnice na poziomie $p < 0.05$ oznaczono „**”) (Bacik et al. 2020). ....	63

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

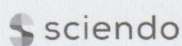
Rysunek 43. Współczynnik zmienności parametrów kinematycznych lotu z podziałem na typ zmiennej (istotne różnice na poziomie $p < 0.05$ oznaczono „*”) (Bacik et al. 2020). .....	63
Rysunek 44. Poziomy zmienności w strategiach "U" i "V" zobrazowane współczynnikami zmienności – klasycznym (modCV) i biologicznym (modBCV). Punkty oznaczają medianę, natomiast „wąsy” wskazują wartości min - maks.....	65
Rysunek 45. Model deterministyczny salta snowboardowego. ....	66
Rysunek 46. Elementy nakładki GUI do modelowania przedstawione w oknie stworzonej aplikacji w środowisku MATLAB. Poszczególne numery odpowiadają opisowi aplikacji.....	71
Rysunek 47. Wyznaczanie faz na podstawie charakterystyk czasowych uśrednionego sumarycznego momentu bezwładności elipsoidy bezwładności, jego pochodnej oraz prędkości kątowej osi ciała. Oś pozioma to numer próbki, natomiast oś pionowa to skala względna umożliwiająca pokazanie różnych zmiennych na jednym wykresie. ....	72
Rysunek 48. Modelowe rozwiązania dwóch wybranych przykładowo zmiennych we wskazanych zakresach wartości. W tym przypadku są to rozwiązania dla wartości wypadkowej prędkości oraz kąta osi ciała w momencie odbicia. Współrzędne podają dokładną wartość kąta lądowania. Biały obszar to zbiór rozwiązań zawierających się w granicy przyjętego zakresu lądowania. ....	73
Rysunek 49. Wytyczne budowy skoczni „big air” do przeprowadzenia zawodów (FIS 2019). .....	74
Rysunek 50. Ustawienie ciała zawodnika w stosunku do deski snowboardowej oraz nachylenia stoku podczas zjazdu (Marciniak 2007). ....	75
Rysunek 51. Odnośniki do materiałów filmowych w postaci kodów QR przedstawiających modelowanie w stworzonej aplikacji. Zawiera salto pojedyncze modelowane strategiami „U” (A) i „V”(B) oraz przykładowe salto podwójne (C). ....	81
Rysunek 52. Przedstawienie wariantów modelowania dla realizacji salt podwójnych ze wskazaniem zmiennych brzegowych, ich uzasadnieniem oraz animacją zaczerpniętą z modelu. ....	82
Rysunek 53. Fragment okna aplikacji modelowania po wprowadzeniu modyfikacji. Widoczne miejsca do „ręcznego” wpisania wartości prędkości kątowych. ....	89

## **SPIS TABEL**

Tabela 1. Charakterystyka badanej grupy.....	26
Tabela 2. Typ snowboardzistów biorących udział w badaniach. ....	27
Tabela 3. Pomiary antropometryczne osoby badanej niezbędne do wyliczeń w systemie Vicon. .....	32
Tabela 4. Liczba wykonanych pojedynczych salt „wildcat” podczas eksperymentu.....	38
Tabela 5. Różnice średnich wartości zmiennych poszczególnych prób pomiędzy saltami wykonanymi strategią „U” i „V” na granicach faz lotu wykazane testem Kołmogorowa-Smirnowa. Pierwszy romb (biały) – początek lotu, drugi romb (czerwony) – koniec fazy grupowania, trzeci romb (czarny) – koniec fazy unoszenia, czwarty romb (czerwony) – koniec fazy utrzymania zgrupowanej pozycji, piąty romb (biały) – koniec lotu. .....	52
Tabela 6. Różnice momentów pędu względem osi pomiędzy strategiami wykonania salta („U” i „V”)......	53
Tabela 7. Wartości zmiennych brzegowych z uśrednionych zaimportowanych danych empirycznych dla strategii „U” i „V”. ....	75
Tabela 8. Warianty modelowania skutkujące realizacją podwójnego salta „wildcat” zgodnie ze strategią „U” i „V” dla kroków 1-6. ....	77
Tabela 9. Warianty modelowania skutkujące realizacją podwójnego salta „wildcat” zgodnie ze strategią „U” i „V” dla kroków 7-10. ....	79
Tabela 10. Warianty modelowania skutkujące realizacją podwójnego salta „wildcat” zgodnie ze strategią „U” i „V” dla kroków 11-14. ....	80
Tabela 11. Zmienne brzegowe uzyskane z podwójnych salt empirycznych. ....	84
Tabela 12. Wyniki modelowania według strategii „U” i „V” po wprowadzeniu danych empirycznych salt podwójnych bez uwzględnienia czasu utrzymania zgrupowanej pozycji ciała. ....	84
Tabela 13. Wyniki modelowania według strategii „U” i „V” po wprowadzeniu danych empirycznych salt podwójnych z uwzględnieniem czasu utrzymania zgrupowanej pozycji ciała. .....	85
Tabela 14. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 9 modelowania strategią „U”......	86

## - ROZPRAWA DOKTORSKA -

Tabela 15. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 10 modelowania strategią „U”.....	86
Tabela 16. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 12 modelowania strategią „V”.....	86
Tabela 17. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 13 modelowania strategią „V”.....	87
Tabela 18. Porównanie danych empirycznych salt podwójnych z danymi wariantu nr 14 modelowania strategią „V”.....	87
Tabela 19. Wartości brzegowe i kąt osi ciała na koniec fazy lotu dla wybranych prób salta podwójnego z pomiarów rzeczywistych oraz wynik uzyskany z modelu na bazie charakterystyki strategii „U” uśrednionych salt pojedynczych. ....	88
Tabela 20. Wartości prędkości obrotowych [ $^{\circ}$ /s] w fazie grupowania pozycji / otwierania pozycji ( $\omega_1$ ) i utrzymania pozycji podczas lotu ( $\omega_2$ ). ....	88
Tabela 21. Kąt osi ciała na koniec fazy lotu dla wybranych prób salta podwójnego z pomiarów rzeczywistych oraz wynik uzyskany z modelu na bazie charakterystyki strategii „U” uśrednionych salt pojedynczych i po zastosowaniu poprawki prędkości obrotowej. Wartości wejściowe do modelu takie jak w tabeli 19.....	89



## Movement Variability During the Flight Phase in a Single Back Sideflip (Wildcat) in Snowboarding

by

Bogdan Bacik<sup>1</sup>, Wioletta Kurpas<sup>1</sup>, Wojciech Marszałek<sup>1</sup>, Piotr Wodarski<sup>2</sup>,  
Grzegorz Sobota<sup>1</sup>, Michał Starzyński<sup>1</sup>, Marek Gzik<sup>2</sup>

*Understanding the structure and variability of motion is essential for sports technique development and an effective training design. Biomechanical analysis is particularly important in new disciplines with spatially complex motions, such as snowboarding. This study aimed to evaluate the level of variability of the kinematic variables in a single backside snowboard flip known as a “wildcat”. Forty-six correct flips performed by 7 experienced athletes (age:  $24.9 \pm 4.34$  year; body mass:  $71.6 \pm 12.87$  kg; body height:  $177.4 \pm 6.99$  cm) were recorded using an optoelectronic VICON system in the controlled setting of an indoor freestyle park. Athletes were equipped with special boards with wheels and the geometry of the ramps corresponded to the actual on-snow conditions. The analysis revealed two distinct single flip strategies, which differed in the way the tuck position was sustained. For all the measured variables, the coefficient of variation was computed, which allowed to identify the athlete with the highest (average 45.3%) and lowest (average 20.5%) variability of kinematic variables. Moreover, it was shown that the lowest values of the coefficient of variation occurred at the end of the grouping phase (average 14%) and that among all the different variables, those related to the duration of motion were most unstable (average 63%, SD = 48.5%).*

**Key words:** snowboarding, sports technique, movement variability, motion capture.

### Introduction

„Biomechanics is uniquely positioned to assist with regard to understanding of already existing techniques, new skill development, increasing safety and equipment design and/or modification” (Prassas and Sanders, 1999). Therefore, biomechanical insights are of particular assistance in new sports with high injury risk. One of such sports is snowboarding, which is developing very rapidly. The main hazards of snowboard are high speed, hard-packed snow and limited visibility (Hasler et al., 2010). The most common causes of injuries are human mistakes (Bladin et al., 2004), usually of technical nature (Zygmuntowicz and Czerwiński, 2007). In freestyle snowboarding aerial disciplines, technical errors usually have strong impact on landing. Consequently, the landing has been the most

studied phase of motion, both in terms of kinematic and kinetic variables (Delorme et al., 2005; McAlpine and Kersting, 2006; McAlpine et al., 2012; Klous et al., 2014; Klous et al., 2014). However, there are no data about the flight phase of snowboarding with quantitative measurements. Landing conditions are determined by the way the flight phase is performed and the orientation of the snowboarder in relation to the movement direction. A distinctly tilted body position is adopted at the jumping ramp by the athletes of various board sports such as snowboarding, wakeboarding, surfing, skateboarding, etc. Snowboard jumps can be performed with or without rotation (straight jump, called *ollie*). The aerial manoeuvres with rotation can be divided into three categories: rotations about the vertical

<sup>1</sup> - Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, Katowice, Poland.

<sup>2</sup> - Biomechatronics Department, Faculty of Biomedical Engineering, Silesian University of Technology, Zabrze, Poland.

Authors submitted their contribution to the article to the editorial board.

Accepted for printing in the Journal of Human Kinetics vol. 72/2020 in April 2020.



body axis (*frontside* and *backside*), flips (*backflip*, *frontflip*, *sideflip* and *back loop*), and two-plane rotations (e.g. *inverted airs*, *corkscrew*, *f/s rodeo*, *b/s rodeo*, *butter shifty*). In this study we analysed a flip called a *wildcat*, with rotation about the sagittal axis (*sideflip*) in the direction opposite to the direction of motion (FIS, 2016).

The variability of movement structure, defined as the normal changes occurring in the structure of movement when repeating the same motor task (Knudson, 2007), is often believed to be related to the efficiency of motion (Stergiou et al., 2006). The three main frameworks which aim to describe the relationship between variability and efficiency include the Generalized Motor Program Theory (GMPT), Uncontrolled Manifold Hypothesis (UCM), and Dynamical Systems Theory (DST).

According to the GMPT (Summers and Anson, 2009), variability of the movement structure should be attributed to errors and noise in the control system (Yeadon, 2017). Hence, one of the objective of subjects learning a motor activity is to reduce movement variability (Jones, 2012).

Latash and his theory of the UCM (Latash et al., 2002) identifies movement variability with motor redundancy. Motor redundancy is a situation in which multiple ways to complete the task are available. According to the UCM, when a multi-component system changes the state of individual parts, the control system does not have to interfere as long as the expected effect remains unchanged. It implies that the variation of individual components is acceptable.

Finally, the theory of DST (Clark and Phillips, 1993) assumes that biological systems self-organise according to environmental, biomechanical and morphological constraints in order to find the most stable solution for the performance of a given movement. Increased variability of the pattern indicates loss of movement stability, while reduced variability reflects very stable behaviour of the system. Based on the DST theory, movement variability can also be considered an adaptive or compensatory potential that can be used to respond to changing conditions (Bradshaw et al., 2007).

Nevertheless, all three theories (GMPT, UCM and DST) agree that reduced variability is conducive to more efficient movement patterns

(Stergiou and Decker, 2011). Therefore, the aim of the study was to evaluate the level of flight variable variation of the snowboard single back side flip (wildcat).

## Methods

### Participants

The study group consisted of 7 male snowboarders, participating in a snowboard instructor course (age:  $24.9 \pm 4.34$  year; body mass:  $71.6 \pm 12.87$  kg; body height:  $177.4 \pm 6.99$  cm; training experience:  $4 \pm 2.5$  year). The evaluations were carried out twice, in May and November. The selection for the study participants was purposeful. The main inclusion criterion was the ability to perform at least a single *wildcat* flip in a standardised laboratory environment. The exclusion criterion was pain declared during warm-up jumps and injuries within six months of the evaluations. All participants were provided with a detailed explanation of the potential risks and benefits of the study and signed an informed consent form before the research commenced. The study followed ethical guidelines consistent with the Declaration of Helsinki and was approved by the ethics committee of the institution of the authors.

### Research methods

The body position was captured by the motion capture system (Vicon, USA), composed of 10 cameras (MX-T40 Bonita NIR) with 100 Hz sampling. The capture volume was 3 m high, 6.5 m long and 4.2 m wide. Static and dynamic calibrations were performed and showed acceptable accuracy.

The additional 4 RGB cameras synchronised with the Vicon system were used to observe the space before the beginning of the flight phase. The origin of the global (lab) coordinate system was located on the left-hand side (as viewed by the incoming forward-facing skateboarder) of the ramp's edge. The X-axis aligned with the ramp's edge, the Z-axis aligned with the direction of gravity, and the Y-axis was orthogonal to both of them. Thirty-nine markers were placed at the anatomical locations according to the Plug-in-Gait protocol (Clark et al., 2016) and two additional markers were fixed to the snowboard and next two to the edge of the ramp. The location of the joints was reconstructed with Nexus software (Nexus 2.0, Vicon, Oxford, UK).



Based on that, a simplified model (14 segments connected by joints) of the snowboarder's body was constructed. Relative masses of the 14 segments were assigned based on Zatsiorski's indices (Zatsiorsky, 1998) and the relative mass of the board itself was taken as 10% of the snowboarder's body mass. At every moment, the centre of mass and the tensor of inertia  $I$  of the model were computed. The trace of  $I$  (cumulative moment of inertia) was used as a descriptor of the snowboarder's posture. Indeed, although for rigid bodies the cumulative moment of inertia is constant, it may vary when the body position changes in time.

#### Measurement protocol

Controlled lab-like conditions were provided by a jump located in the "Freestyle Park" facility in Chorzów, Poland (Figure 1). The jump consisted of in-run ramps and a foam pit which ensured safe landings. The ramps' design corresponded to the geometry of natural on-snow structures. They were located indoors and had a fixed (wooden) surface, thus standardising the weather conditions (air movement, temperature, precipitation) and mechanical conditions (coefficient of friction, ramp geometry). Participants moved on the surface of the ramp on dedicated boards with wheels. Each participant wore a black uniform (required by the motion analysis system) and a protective helmet. Boards were chosen individually. In-run specification is as follows: starting platform's height: 5.6 m; in-run length: 16.6 m; height of the ramp lip: 2.3 m; angle of the ramp lip: 30°. The platform's height was measured to the lowest point of the in-run to the starting point. The in-run length was measured from the starting platform to the ramp lip. The ramp lip height was measured from the ramp lip to the lowest point of the in-run. NIR cameras were placed on a special 12 x 6 m truss, located about 2 m above the ramp lip.

Anthropometric measurements were taken and an individual warm-up was administered prior to the jumping session. Each participant chose the warm-up time and exercises according to their own experience. All athletes had already practised at the freestyle park so they were familiar with the conditions of performing under these specific conditions. Each athlete attempted to perform a wildcat flip 10 times. A performance was described as successful when

the snowboard made contact with the ground (the surface of the foam pit) first, i.e. before the body. The rest intervals between trials were selected individually and lasted from 3 to 6 minutes. A total of 46 successful wildcat flips were recorded and analysed.

#### Results

Based on the position of the body markers, several kinematic variables were computed:

- (1) positions: vertical (COM<sub>z</sub>) and horizontal (COM<sub>y</sub>) position of the centre of mass (based on Zatsiorski's indices (Zatsiorsky, 1998),
- (2) speeds: vertical (V<sub>comz</sub>) and horizontal (V<sub>comy</sub>) components of the instantaneous velocity of the COM,
- (3) geometric: the angle between the axis passing through the body COM and head COM and the vertical plane,
- (4) inertial: cumulative moment of inertia of the body (trace  $I$ ), defined as the trace of the normalised inertia tensor.

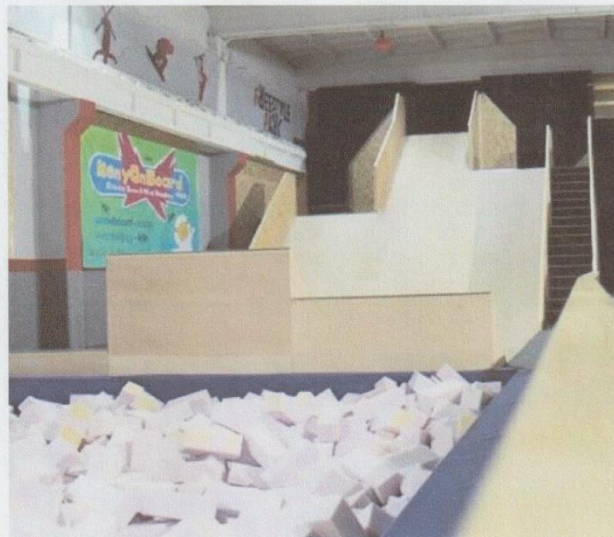
Subsequently vertical displacement of the COM and the cumulative moment of inertia were used to divide the flight into the following phases: raising (A-C) and falling (C-E), grouping (A-B), maintaining a stable position (B-D), and ungrouping (D-E) (Figure 2). The cumulative moment of inertia analysis revealed that two distinct techniques were used by participants: one with a prolonged period spent in the grouped position (Figure 2) (participant 2, dashed lines) and another one with immediate ungrouping after reaching the grouped position (participant 3, solid lines).

The values of quantities (1)-(4) attained at the phase boundaries (A, B, C, D - Fig. 2) were used for 4 different types of motion variables: linear, speed, angular, and inertial. Apart from the variables at the phase boundaries, we also calculated their increments during individual phases (during flight). The duration of individual phases itself provided yet another class of time variables. The coefficient of variation (CV) for each variable was calculated by grouping them according to the participant, instant of the movement, and the type of the variable. The values of CV were also used to evaluate across-subject variability where due to the lack of normality, the Kruskal-Wallis test was deployed.



The analysis of tCV revealed further differences between individuals (Figure 3). Three participants (1, 4 and 5) differed significantly with regard to the variability presented by the entire group; they were characterized by greater repeatability of basic flight variables. The only significant difference between snowboarders was observed between participants 1 and 5. Snowboarder 1 had the most stable flight variables among all the participants. With regard to the phase structure, the most variable were parameters related to increments within phases (phase times, changes in body position or location). The average CV reached 53% (SD-41.0%), while the mean for the

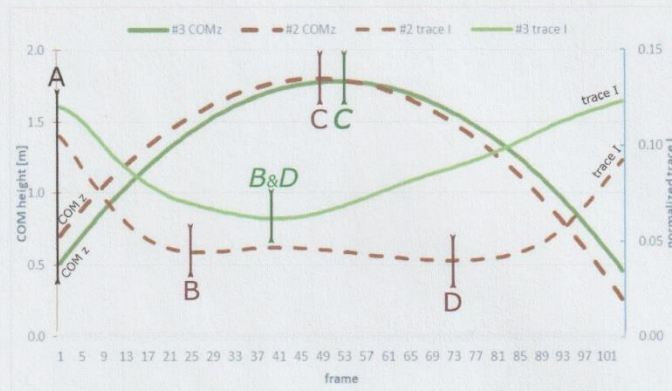
instantaneous quantities at phase boundaries was 25% (SD-37.2%). Comparison of the variability at the phase boundaries showed that the most stable was the end of the body grouping phase (B) where the average variation of kinematic variables of flight was 14% (SD- 13.5%), i.e., more than three times less than the flight variables. As far as the variable type is concerned (Figure 5), most variation was observed in time variables with the average CV of 63% (SD-48.5%). The most stable variables were those describing the inertial variables based on the tensor inertia (the average CV was 15% (SD-9.2%)).



**Figure 1**

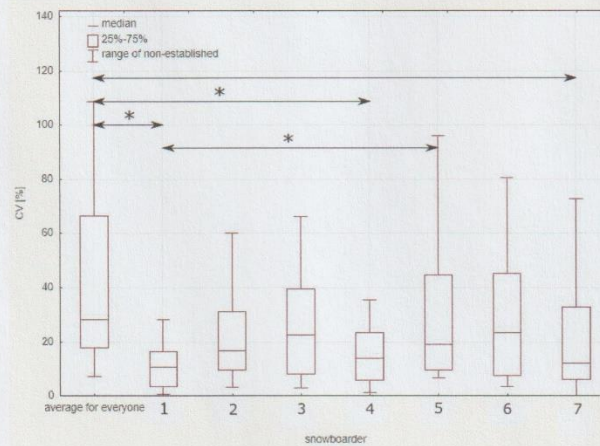
*The ramp on which the tests were performed.*





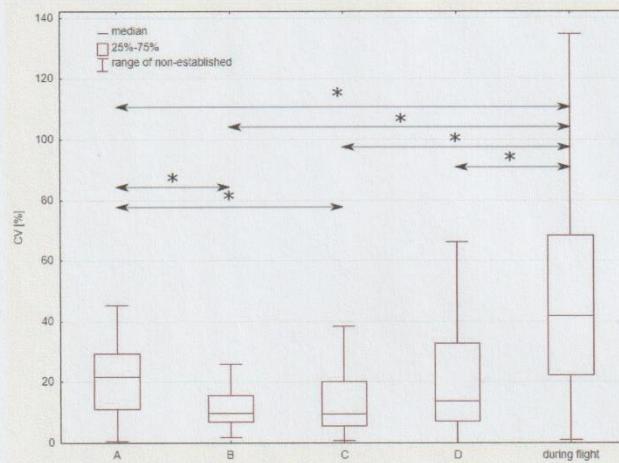
**Figure 2**

Example of the vertical displacement of the COM (hCOM) and change of cumulative moment of inertia (trace I) in the wildcats of two snowboarders (No. 2 and No. 3). The beginning of flight and extrema of trace I and COMz were used to determine the boundaries of the movement phases. Phase boundaries were denoted with letters: A - beginning of flight, B - end of grouping, C - maximum height of COM, D - beginning of ungrouping.

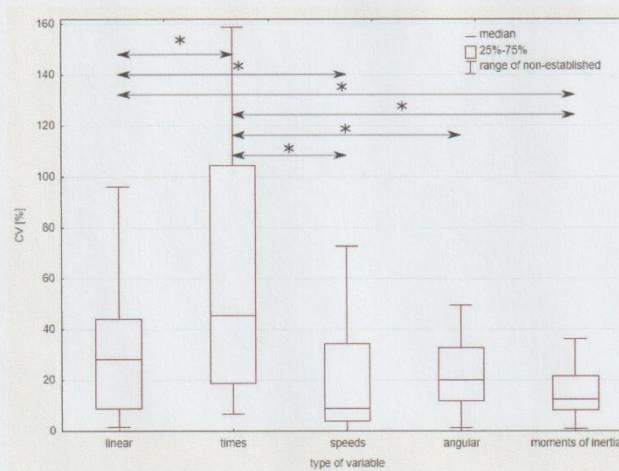


**Figure 3**

Differences in the coefficient of variation (CV) for all variables between the study participants and variability for the whole group (average for everyone). \* -  $p < 0.05$



**Figure 4**  
Coefficients of variation for kinematic variables of flight at phase boundaries (A, B, C, D) and in individual phases. \* -  $p < 0.05$



**Figure 5**  
Coefficients of variation for flight variables by type. Linear - variability of position and displacement variables in translational motion, times - variability of time of individual phases, speeds - variability of speed in translational motion, angular - variability of angular variables - position and displacement, moments of inertia - variables of moment of inertia - normalized values, speed (change gradient) and degree of grouping. \* -  $p < 0.05$



## Discussion

This study aimed to evaluate the level of variation of flight variables for a single snowboarding back sideflip (*wildcat*). To our knowledge this is the first study of this type. The analysis of flight variables in the back sideflip (*wildcat*) using the coefficient of variation (CV) allowed to indicate the most stable, i.e. least variable parameters which included the moment of inertia among the flight variables (CV = 15%, SD = 9.2%) and the most stable instants of motion which turned out to be the completion of grouping. The correlation of these variables indicates how important it is to adopt and maintain a stable position (grouping) during rotation. By the law of conservation of angular momentum, the moment of inertia determines the angular velocity which can be exercised using the angular momentum gained in the in-run (take-off) phase. Grouping itself also plays the role a countermovement. Adopting and maintaining a stable, grouped body position leads to lower variation of the variables during the flip, and, consequently, improved stability and effective performance. This is confirmed by the results of snowboarder 1, who had the lowest coefficient of variation, and his movements were the most effective and reproducible. He was one of the two participants who were able to perform a double rotation under the test conditions. This confirms the theory that reduced variability leads to a more effective performance of a given movement pattern (Stergiou and Decker, 2011). Snowboarders who were able to maintain a grouped position showed a much lower CV. This was also confirmed by the average variation of kinematic variables of flight amounting to 14% only (SD- 13.5%) at the end of the grouping phase. However, it should be emphasized that the flight parameters were relatively variable, with the average for all of them of 30% (SD 39.1%). There are no studies in the literature on rotation in the sagittal axis (sideflips) characteristic of boardsports such as snowboarding. This may be explained by the fact that the history of the development of these sports is rather short, yet dynamic and that it is difficult to conduct research in a standardised natural on-snow environment (Żebrowska et al., 2012). However, similar values of the coefficient of variation have been found in other snow sports. Nedergaard et al. (2015)

obtained an average CV of 25.7% in a study of kinematic variables of the ski cross start phase. Kurpiers et al. (2009) carried out a biomechanical analysis of mogul skiing and received CV value of 47%. Furthermore, in a study of snowboard landing CV for kinematic variables was on average 26% (McAlpine et al., 2012).

It should be noted that the values of coefficients of variation of kinematic variables are highly dependent on the type of movement. In simple natural jumps (SJ), the variation is about 10%. In the study published by Bobbert et al. (1996), the height of the CMJ jump in 6 female volleyball players was characterized by a variation of 7.5%, but in three types of jumps, this value increased to 10.3%. The variation of CoM height at the beginning of the take-off phase in the CMJ was 9.7%, but in the SJ jump performed with the lowest possible position of the take-off, it reached 16.4%. On the contrary, for the same type of the jump (SJ) performed from the preferred position, variability was only 5.6%. In this study, vertical velocity was characterized by variation of about 6%. However, the hip angle variation at the moment of the beginning of the take-off reached 20.5% in the CMJ and 15.7% in the SJ. The research of more complex jumps provided interesting insights. Recorded during the Olympic Games in Seoul (Hwang et al., 1990), 21 gymnastic somersaults (seven layout double backward somersaults - L, seven twisting double backward somersaults TW, and seven tucked double backward somersaults - TDB) showed very little variation of the take-off angle: 7% (L), 6.5% (TW), and 5.6% (TDB). These values were even smaller for the landing angle (ca. 3% each) in all somersaults. Similarly, the variation in horizontal velocity at the beginning of landing accounted to several percent (9% for L, 7% for TW, and 12% for TDB). These small values of variation in such complex techniques demonstrate high repeatability and effectiveness of performance resulting from perfect technique and full control during the flight (which is a prerequisite for obtaining and maintaining a stable position), while counteracting destabilising forces that are connected with the movement of bodies in space, e.g. centrifugal force. This is confirmed by the analysis of parameters of variability in individual phases of rotation performed in this study, where



the smallest variation occurred between the end of grouping and the beginning of ungrouping. The comparison of variation of the cumulative moment of inertia in the phases of performance of two isolated wildcat techniques also confirms that faster adoption of a compact position (board grip) and its longer holding until opening (board release) are characterized by very little variation in the moment of inertia. Compared to a technique in which the board grip occurred much later and was very short, the moment of inertia showed great variation throughout the rotation. Therefore, it can be concluded that adoption (and maintaining) a grouped position in rotations represents one of the conditions for their effective performance in all sports where competitors rotate around different axes of the body. As the grouping mechanism appears to be essential to body stabilisation during flight and the effective performance of the rotation, it would be interesting to identify what mechanisms ensure effective aerial manoeuvres for motions without the grouping phase, e.g. simple flips and rotation about the long axis.

This study represents a pioneering attempt to analyse *wildcat* side flips in snowboarding using the environment very similar to natural on-snow conditions provided by a safe, standardised and repeatable ramp located in a freestyle park. The results obtained using this method motivates further research in other groups of athletes and the analysis of aerials with a higher level of difficulty, in various sports practised on jumps and in-run ramps, especially freestyle sports. It also seems reasonable to extend the research equipment with further systems providing data from other areas. This will undoubtedly help develop technical models of performing individual elements and identify variables that have the greatest effect on their proper performance, translating into effective training of athletes in various sports.

### Acknowledgements

This work was supported by a Polish Ministry of Science and Higher Education grant (No. 0014/RS4/2016/54). The motion data used in this project were measured in cooperation with the Centre for Research and Development of Polish-Japanese Academy of Information Technology [www.bytom.pja.edu.pl](http://www.bytom.pja.edu.pl).

### Limitations of the study

Due to the characteristics of the ramps which require athletes to have a high level of snowboarding skills, a limitation of this study is a small sample size. This represents a certain limitation to the present study. Furthermore, it represents a specific criterion for the selection of snowboarders at an adequately high performance level.

### Practical implications

The above results may be used as a methodological guide for coaches in freestyle and gymnastic sports, in which body control in the air is one of the basic criteria for achieving an elite sports level. The study indicates the factors and technique that have a direct impact on the efficiency and repeatability of performing rotation during flips. In this specific case, they concern a rotation in the sagittal axis and snowboarding technique, but the conclusions may also be applicable to many related sports.

### Conclusions

The correct performance of a *wildcat* flip is characterized by about 30% variation of kinematic variables of flight. Global CV (concerning all movement variables) offers opportunities to evaluate movement stability. Adoption and maintaining a stable body position during the flight phase seems to be critical for effective performance of a snowboard flip, which can be achieved, among other things, by grouping.

The novel application of the research apparatus in the freestyle park facility opens up new opportunities for research in various sports, especially freestyle sports such as snowboarding, skiing, rollerblading, and bmx, which are increasingly added to the official Olympic program.



**References**

- Bladin C, McCrory P, Pogorzelski A. Snowboarding injuries - Current trends and future directions. *Sport Med*, 2004; 34(2): 133–138
- Bobbert M, Gerritsen K, Litjens M, Van Soest A. Why is counter-movement jump height greater than squat jump height?. *Med Sci Sport Exerc*, 1996; 28 1402–1412
- Bradshaw EJ, Maulder PS, Keogh JWL. Biological movement variability during the sprint start: Performance enhancement or hindrance?. *Sport Biomech*, 2007; 6(3): 246–260
- Clark CCT, Barnes CM, Holton M, Summers HD, Stratton G. A Kinematic Analysis of Fundamental Movement Skills. *Sport Sci Rev*, 2016; 25(3–4): 261–275
- Clark JE, Phillips SJ. A Longitudinal Study of Intralimb Coordination in the First Year of Independent Walking: A Dynamical Systems Analysis. *Child Dev*, 1993; 64(4): 1143–1157
- Delorme S, Tavoularis S, Lamontagne M. Kinematics of the ankle joint complex in snowboarding. *J Appl Biomech*, 2005; 21(4): 394–403
- FIS. Judges Manual Snowboard; Oberhofen: Federation Internationale de Ski; 2016
- Hasler RM, Berov S, Benneker L, Dubler S, Spycher J, Heim D, Zimmermann H, Exadaktylos AK. Are there risk factors for snowboard injuries? A case-control multicentre study of 559 snowboarders. *Br J Sports Med*, 2010; 44(11): 816–821
- Hwang I, Seo G, Liu ZC. Takeoff Mechanics of the Double Backward Somersault. *Int J Sport Biomech*, 1990; 6: 177–186
- Jones PE. The Mechanics of Takeoffs in the Aerials Event of Freestyle Skiing; Loughborough University; 2012
- Klous M, Müller E, Schwameder H. Three-Dimensional Lower Extremity Joint Loading in a Carved Ski and Snowboard Turn : A Pilot Study. *Comput Math Methods Med*, 2014; September: 1–13
- Knudson D. *Fundamental of Biomechanics*, 2007; (Second Ed.) Springer
- Kurpiers N, McAlpine PR, Kersting UG. Perspectives for comprehensive biomechanical analyses in mogul skiing. *Res Sport Med*, 2009; 17(4): 231–244
- Latash ML, Scholz JP, Schoener G. Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability. *Exerc Sport Sci Rev*, 2002; 30: 26–31
- McAlpine P, Kersting U. Development of a Field Testing Protocol for the Biomechanical Analysis of Snowboard Jump landings –a Pilot Study. In *XXIV ISBS Symposium*, 1–4; 2006
- McAlpine P, Kurpiers N, Kersting U, Determan J, Australian S. Biomechanical Analyses of Snowboard Jump Landings. In *30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, 105–108; 2012
- Prassas S, Sanders R. Biomechanical Research in Gymnastics: what is done, what is needed. In S. Prassas & R. Sanders (Eds.), *ISBS '99 : XVII International Symposium on Acrobatics*, Cowan University, 1–20; 1999
- Stergiou N, Decker LM. Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection?. *Hum Mov Sci*, 2011; 30(5): 869–888
- Stergiou N, Harbourne RT, Cavanaugh JT. Optimal Movement Variability, a new theoretical perspective for neurologic PT. *J Neurol Phys Ther*, 2006; 30(3): 120–129
- Summers JJ, Anson JG. Current status of the motor program: Revisited. *Hum Mov Sci*, 2009; 28(5): 566–577
- Yeadon MR. Airborne Movements: Somersaults and Twists. In *Handbook of Human Motion*, 19; 2017
- Zatsiorsky VMM. Kinematics of Human Motion, *Human Kinetics*; (10th ed.) Human Kinetics; 1998
- Zygmuntowicz M, Czerwiński E. The Causes of Injuries in Freestyle Snowboarding. *Med Sport*, 2007; 11(4): 102–104
- Żebrowska A, Żyła D, Kania D, Langfort J. Anaerobic and aerobic performance of elite female and male snowboarders. *J Hum Kinet.*, 2012; 34: 81–88.

**Corresponding author:**

**Bogdan Bacik,**

Department of Human Motor Behavior,

The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Poland.

Phone number +48 32 2075188; E-mail: b.bacik@awf.katowice.pl