



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

ROZPRAWA DOKTORSKA

DYSCYPLINA: ZOOTECHNIKA I RYBACTWO

mgr inż. Katarzyna Becker

**Wpływ struktury przeszkody i parametrów parkuru
na biomechanikę skoku koni**

*Influence of obstacle structure and course parameters
on the biomechanics of horse jumping*

PROMOTOR

dr hab. inż. Dorota Lewczuk, prof. IGBZ
Instytut Genetyki i Biotechnologii Zwierząt PAN w Jastrzębcu



BYDGOSZCZ 2023

Podziękowania

Składam podziękowania Pani dr hab. inż. Dorocie Lewczuk prof. IGBZ PAN za wszelką pomoc uzyskaną podczas realizacji prac badawczych, które składają się na moją dysertację doktorską.

Dziękuję za pomoc merytoryczną, wsparcie i wiarę, które na co dzień pozwalały mi kształcić się w zakresie biomechaniki skoku. Motywacja do uczestnictwa w konferencjach naukowych szczebla krajowego i międzynarodowego pomogła mi ukształtować się naukowo.

Dziękuję Kochanym Rodzicom, Cioci Marii i narzeczonemu Jakubowi, którzy nieustannie wspierają mnie w realizacji marzeń zawodowych i pomagają mi zbudować wymarzoną stajnię.

SPIS TREŚCI

1.	Wykaz artykułów naukowych stanowiących cykl publikacji rozprawy doktorskiej...	7
2.	Uzasadnienie spójności tematycznej cyklu publikacji rozprawy.....	8
3.	Cel badań i hipotezy badawcze.....	9
4.	Wstęp i przegląd piśmiennictwa.....	10
5.	Materiał i metody badań.....	14
5.1.	Sprzęt pomiarowy wykorzystany w doświadczeniu.....	14
5.2.	Wpływ struktury przeszkody i parametrów parkuru na parametry biomechaniczne skoku	15
5.3.	Korelacje pomiędzy cechami	17
6.	Analiza statystyczna.....	18
6.1.	Analiza statystyczna czynników wpływających na parametry skokowe.....	18
6.2.	Analiza korelacji między parametrami skoku i chodu.....	18
7.	Wyniki.....	19
7.1.	Wpływ struktury przeszkody i parametrów parkuru na parametry biomechaniczne skoku.....	19
7.2.	Korelacje pomiędzy cechami	20
7.2.1.	Korelacje pomiędzy cechami skoku.....	20
7.2.2.	Korelacje pomiędzy cechami chodów.....	21
7.2.3.	Korelacje pomiędzy cechami skoku i chodów.....	21
8.	Dyskusja.....	23
8.1.	Wpływ struktury przeszkody i parametrów parkuru na parametry biomechaniczne skoku.....	23
8.2.	Korelacje pomiędzy cechami	25
9.	Podsumowanie.....	28
10.	Wnioski.....	31
11.	Literatura.....	32

12.	Streszczenie.....	34
13.	Abstract.....	36
14.	Załączniki.....	39
14.1.	Kopie artykułów naukowych stanowiących cykl publikacji rozprawy doktorskiej.....	39
14.2.	Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej.....	65
14.3.	Oświadczenie współautorów artykułów naukowych.....	66

1. WYKAZ ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH STANOWIĄCYCH CYKL PUBLIKACJI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Dysertacja doktorska przedstawiona jest w formie cyklu prac naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych z wykazu Ministerstwo Edukacji i Nauki (MEiN) o łącznej punktacji 250 i sumarycznym wskaźniku Impact Factor: 3,625.

Publikacja 1. Becker, K., Lewczuk, D. (2020). Wykorzystanie akcelerometru i żyroskopu w badaniach biomechanicznych koni. *Medycyna Weterynaryjna*, 76(12). DOI: <http://dx.doi.org/10.21521/mw.6481>, pkt. 40, Impact Factor: 0,383

Publikacja 2. Becker, K., Lewczuk, D. (2022). Variability of Jump Biomechanics Between Horses of Different Age and Experience Using Commercial Inertial Measurement Unit Technology. *Journal of Equine Veterinary Science*, 119, 104146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104146>, pkt. 70, Impact Factor: 1,313.

Publikacja 3. Becker, K., Lewczuk, D. (2022). Phenotypic correlations between jump and gaits characteristics measured by inertial measurement units in horse jumping training-preliminary results. *Livestock Science*, 266, 105112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105112>, pkt. 140, Impact Factor: 1,929.

2. UZASADNIENIE SPÓJNOŚCI TEMATYCZNEJ CYKLU PUBLIKACJI ROZPRAWY

Poznanie czynników wpływających na biomechanikę skoku koni i zależności między parametrami ruchu jest podstawowym warunkiem doskonalenia zdolności skokowych. Dzięki bardzo szybkiemu, technicznemu rozwojowi metod badań wykorzystujących układy do pomiaru inercji (IMU) możliwy jest elektroniczny, automatyczny pomiar wielu parametrów biomechanicznych i fizjologicznych treningu. Wykorzystaniu nowej techniki do analizy skoków w warunkach zróżnicowanych elementów parkuru, ocenie zmienności prawidłowości parametrów skokowych oraz zależności pomiędzy tymi parametrami skokowymi a parametrami określającymi jakość chodów poświęcona jest przedstawiana dysertacja doktorska.

Prace badawcze wchodzące w jej skład są skoncentrowane na parametrach biomechanicznych koni skokowych. Po przeprowadzeniu przeglądu literatury na temat możliwości wykorzystania nowej techniki w użytkowaniu koni, stanowiącego pierwszą publikację cyklu oraz po przeprowadzonej analizie dostępnych na rynku metod badawczych do realizacji doświadczeń wytypowano komercyjne urządzenie pomiarowe SEAVER®, które dostarcza także informacji o stanie kondycyjnym koni, co pozwala kontrolować warunki treningu. W pracach badawczych oceniono zmienność biomechaniki skoku między końmi w różnym wieku, z uwzględnieniem różnej struktury przeszkód oraz zadań treningowych, a następnie zbadano korelacje fenotypowe pomiędzy charakterystyką skoku i chodów koni. Prezentowane w pracy badania miały na celu dostarczenie naukowych podstaw oceny zdolności skokowych koni w różnym wieku i doświadczeniu przy użyciu nowej obiektywnej metody opartej na zastosowaniu układów pomiaru inercji. Badania przeprowadzono podczas treningu roboczego, w ośrodkach treningowych jeźdźców posiadających pierwszą klasę sportową PZJ, co pozwala przypuszczać, że uzyskane wyniki mogą stanowić wstęp do tworzenia standardów w ocenie wytrenowania koni sportowych oraz być przydatne dla trenerów i hodowców.

3. CEL BADAŃ I HIPOTEZY BADAWCZE

Celem prezentowanych badań była ocena, jak zmieniają się parametry skoku w zależności od różnych czynników środowiskowych, w tym opisujących wpływ wieku i doświadczenia koni skokowych podczas pracy treningowej, a także oszacowanie zależności między cechami skokowymi i ruchowymi koni sportowych poprawionych na czynniki środowiskowe takie jak ośrodek treningowy, wiek/doświadczenie koni oraz warunki struktury parkurów; w tym typ przeszkody, wysokość i kolejność skoku.

Postawiono następujące hipotezy badawcze:

- 1) wyższy wiek i poziom doświadczenia treningowego koni zdobytego podczas zawodów skutkuje mniejszą zmiennością parametrów biomechanicznych na przeszkodach o różnej strukturze i parametrach,
- 2) charakterystyka skoku wyrażona pomiarami kinematycznymi i dynamicznymi jest wysoko skorelowana z jakością chodów opisanych za pomocą biomechanicznych parametrów ruchu.

4. WSTĘP I PRZEGLĄD PIŚMIENICTWA

Konie sportowe są hodowane na całym świecie w celu konkurencji w wielu dyscyplinach sportowych, takich jak skoki przez przeszkody, ujeżdżenie i WKKW. W samej Irlandii przemysł koni sportowych wnosi szacunkowo 816 mln euro do irlandzkiej gospodarki; hodowla jest największym sektorem i odpowiada za 271 mln euro (33,2%) tego wkładu, z czego większość jest generowana w gospodarce wiejskiej (Doyle i wsp. 2022). W hodowli koni gorącokrwistych jakość chodów ma znaczący wpływ na ich wartość. W ujeżdżeniu zrównoważony i elastyczny chód ułatwia trening, a stęp, kłus i galop są regularnie oceniane na różnych poziomach zawodów. W skokach przez przeszkody uznaje się, że charakterystyka galopu wpływa na to, w jakim stopniu zdolności skokowe konia mogą być wykorzystane w sporcie i zawodach (Becker i wsp. 2001). Rozwój dyscyplin jeździeckich zwiększa zapotrzebowanie na doskonale użytkowo konie sportowe. Do wyłonienia wysokiej klasy talentów potrzebny jest zrównoważony trening dostosowany do naturalnych predyspozycji zwierząt. Celem szkolenia koni sportowych jest przygotowanie do startów w zawodach według szczegółowych zasad skoków i wytycznych treningowych opisywanych przez Międzynarodową Federację Jeździecką (FEI, FEI Jumping Rules, 26th Edition, 2019). Doskonalenie umiejętności skokowych jest możliwe tylko przy właściwym doborze metod treningu. Trening wierzchowy to skomplikowany proces, który zależy od wielu czynników, interakcji wpływów środowiskowych i genetycznych, w tym behawioralnych i biomechanicznych. Szczególnego znaczenia w precyzyjnym monitoringu treningu nabiera ocena zdolności biomechanicznych. Rosnące potrzeby kształcenia i rozwoju wśród trenerów i zawodników przyczyniły się do poszukiwania precyzyjnej wiedzy na temat zależności biomechanicznych w treningu wierzchowym koni. Na jakość zdolności skokowych wpływa wiele czynników, które mogą kształtować biomechanikę ruchu zwierzęcia. Jeździec ma za zadanie za pomocą odpowiednich metod treningowych zrównoważyć konia, dzięki czemu koń będzie poruszał się w naturalnym rytmie i równowadze. Uzyskanie powtarzalnych, wykonanych z odpowiednią siłą skoków o właściwej paraboli lotu świadczy o wysokiej wartości użytkowej i przydatności konia do sportu.

W przeszłości prowadzono już badania biomechaniczne (głównie podczas zawodów), które koncentrowały się na wpływie przeszkód i ich trudności na parametry biomechaniczne. Porównywano z wykorzystaniem metod wizualnych (60 klatek na sekundę) kinematykę skoków na rowie z wodą u doświadczonych par biorących udział w Igrzyskach Olimpijskich

w Barcelonie w 1992 roku (Colborne i wsp. 1995, Clayton i wsp. 1995), przy użyciu tych samych metod przeanalizowano zmienne kinematyczne podczas fazy odbicia w Konkursie Potęgi Skoku, który odbył się w Dublinie w 1998 roku (Powers 2016). Nagrania z kamery ustawionej podczas Mistrzostw Świata w Sztokholmie w 1990 roku, analizowano pod kątem fazy odbicia na pierwszej stacjonacie konkursu o wysokości 150 cm (Van den Bogert i wsp. 1994). Podobną metodologię dla przeszkód typu; stacjonata i okser zastosowano podczas konkursu przesiadanego podczas Mistrzostw Świata w Aachen 1999 roku (Lütteken 2001), jednak celem badania było porównanie wpływu jeźdźców. W kolejnych latach przy pomocy dwóch kamer analizowano kinematykę podczas pokonywania parkurów Igrzysk Olimpijskich w Seulu w 1988 roku podczas konkursu drużynowego (Duel i Park 1991) oraz podczas Grand Prix Rothmana w Kanadzie w 1981 roku (Leach i wsp. 1984). Badania dotyczące zmienności biomechaniki kopyta na różnego rodzaju podłożach zostały przeprowadzone przy pomocy kamery (1000 klatek na sekundę) na różnej wysokości przeszkód i opublikowane w 2010 (Hernlund i wsp. 2010). Wpływ wysokości i szerokości przeszkody podczas treningu roboczego na ułożenie kończyn podczas skoku przy użyciu kamer (250 fps) ocenili Clayton i Barlow (1991). W 1997 roku zespół badaczy opublikował pierwsze wyniki analiz skoków z wykorzystaniem analizatorów przyspieszeń o częstotliwości 50 Hz (Barrey i Galloux 1997). Następnie Falaturi i współautorzy (2001) korzystali z urządzenia o częstotliwości 1000 Hz i prowadzili obserwację ciągłą na przeszkodach trwającą 8 min. Istotnym z punktu widzenia oceny parametrów biomechaniki skoku narzędziem w rękach specjalistów stały się płyty siłowe, które umożliwiają ocenę parametrów odbicia i lądowania, jednak ich małe wymiary stanowiły ograniczenie w badaniach, podwyższając ryzyko kontuzji. Przy pomocy płyt siłowych badano obciążenia kończyn przy lądowaniu (Merkens i wsp. 1991, Schamhardt i wsp. 1993, Meershoek i wsp. 2001). Wykorzystanie płyt w badaniach i połączenie wyników z różnych technik pozwoliło poznać moment bezwładności i moc generowaną przez kończyny podczas odbicia (Dutto i wsp. 2004). Większość cytowanych prac wykonywana była na pojedynczych przeszkodach i na ściśle sprecyzowanej grupie koni. Badania te dotyczyły zazwyczaj jednej grupy badanych parametrów – kinematycznej lub dynamicznej i nie przeprowadzano ich jednocześnie, co nie pozwoliło określić związku między nimi. Dopiero układy do pomiaru inercji (IMU- ang. Inertial Measurements Units) pozwalają w sposób kontrolowany przeprowadzić całościową analizę biomechaniczną skoku w najbardziej naturalny sposób w czasie pokonywania całego parkuru. Pomimo, że wyniki cytowanych prac ze względu na różnice metodyczne i różne warunki eksperymentów nie mogą być porównane bezpośrednio, są nieocenionym źródłem wiedzy podczas wnioskowania zależności w wynikach

własnych. Dotychczas nie wykorzystywano w biomechanice skoku urządzenia typu IMU do badań dotyczących samych metod treningowych koni.

Urządzenie IMU posiada dodatkowo możliwość monitoringu wysiłku wydolnościowego – tętna oraz pomiarów długości pokonanej trasy. Pozwala to na kontrolę nie tylko samych parametrów biomechanicznych, ale także ocenę kondycji koni, w tym przetrenowania czy utraty regularności i symetrii. Jest to szczególnie ważne ponieważ cały proces „produkcji” konia sportowego jest skoncentrowany obecnie na ograniczeniu kulawizn poprzez prewencję polegającą na zrównoważonym treningu i minimalizowaniu ryzyka poprzez niedopuszczanie do przeciążeń. Dyskomfort odczuwany przez konie może początkowo wpływać na jakość skoku, a dopiero w późniejszym etapie ukazać się w formie kulawizny. Dayson i współautorzy (2022) w swoich badaniach stwierdzają, że kulawizny lub zaburzenia chodu w galopie można przeoczyć jeśli konie nie są oceniane pod siodłem. Lewczuk i Metera-Zarzycka (2019) podkreślają, że zastosowanie obiektywnych metod oceny dostarcza ważnych informacji dla praktyki. Różnice fenotypowe między końmi mogą być niejasne w ocenie subiektywnej, obiektywna ocena powinna być wykorzystana do scharakteryzowania potencjału użytkowego różnych ras czy pojedynczych osobników. Zgodnie z zasadami szkolenia, symetria i regularność chodów konia są pożądanymi oznakami zdrowia, wysokich wyników treningowych i prawidłowego użytkowania. Regularność chodu jest podkreślana przez jeźdźców jako najważniejsza cecha koni, w związku z tym należy ją precyzyjnie monitorować, aby zapewnić prawidłowy schemat treningowy i odpowiedni program kondycyjny (Lewczuk i Maśko 2021). Na świecie stopniowo zauważa się deficyt sprawdzonych naukowo metod treningowych w procesie szkolenia koni sportowych. St. George i współautorzy (2019) podkreślają, że dotychczasowe metody selekcji i szkolenia koni w skokach przez przeszkody są w dużej mierze oparte na przypuszczeniach i doświadczeniach specjalistów, nie zawsze uzasadnionych wynikami badań naukowych. Naukowcy publikują wyniki swoich prac, które mają za zadanie jeszcze lepiej scharakteryzować i zobiektywizować wiedzę dotyczącą szkolenia koni skokowych. Podkreślają, że wykorzystanie tej wiedzy jest możliwe przy jednoczesnym zrozumieniu nauki i praktyki, które zwiększy szanse dopasowania wskaźników wydajności koni sportowych. Sport jeździecki koncentruje się na współpracy konia i jeźdźcy, a pomiar parametrów treningu może istotnie wpłynąć na dobór właściwych metod i stałe monitorowanie dyspozycji fizycznej koni, tym bardziej, że komercyjne sensory IMU zyskują na popularności (Thompson i wsp. 2019, Maisonpierre i wsp. 2019). Rozprawa doktorska obejmuje wprowadzenie do problematyki

badawczej będące artykułem przeglądowym dotyczącym wykorzystania inercyjnych jednostek pomiarowych (IMU – Inertial Measurement Units) w badaniach biomechanicznych koni oraz przedstawienie badań dotyczących pomiarów skokowych wykonanych za pomocą tych czujników. W części pierwszej sprawdzono wpływ wybranych czynników na parametry biomechaniczne skoku, a w części drugiej oceniono zależności pomiędzy pomiarami skoku i chodów koni skokowych.

5. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Badania przeprowadzono w latach 2019 i 2020 w dwóch ośrodkach treningowych na krytej ujeżdżalni. Podczas codziennych treningów skokowych przebadano konie sportowe w różnym wieku. W każdym ośrodku do badań wytypowano sześć regularnie trenujących koni, które brały udział w badaniach pod zawodnikiem dyscypliny skoków posiadającym I klasę sportową PZJ.

5.1. SPRZĘT POMIAROWY WYKORZYSTANY W DOŚWIADCZENIU

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem dostępnej na rynku technologii Seaver opartej na technologii IMU, która umożliwia zbieranie parametrów kinematycznych i dynamicznych skoków i chodów. Inercyjna jednostka pomiarowa, która posłużyła do zebrania danych, składała się z 3-osowego akcelerometru, żyroskopu oraz magnetometru o częstotliwości 60 Hz. Dane zebrane przez IMU były przesyłane przez Bluetooth do smartfona i przechowywane na serwerze online. Urządzenie o wymiarach 14×22 cm i masie 375 g zamontowano na popręgu siodła, natomiast dodatkową elektrodę urządzenia (35 g) umieszczono za kłębem po lewej stronie konia, pod czaprakiem. Urządzenie określa niektóre parametry na podstawie kalibracji (np. rozpoznawanie kroku galopu i skoku konia na podstawie lokalizacji urządzenia podanego przez zakładającego). Zgodnie z instrukcją obsługi wykonano podstawowe pomiary niezbędne do kalibracji urządzenia. Wprowadzono wagę jeźdźcy i konia, a także wysokość w kłębie konia. Dodatkowo zmierzono odległość od podłoża do sensora oraz od połowy łopatki do popręgu (Publikacja 2; rysunki 1 i 2).

Urządzenie i oprogramowanie Seaver daje możliwość monitorowania podstawowych charakterystyk treningowych - tętna, całkowitego pokonanego dystansu, czasu trwania treningu, łącznej liczby skoków oraz intensywności treningu (wyrażonej jako poziom tętna [HR] w minutach). Dwie diody umieszczono na tułowie konia, pod popręgiem oraz pod siodłem w okolicy kłębu. Odstęp między pomiarami tętna wynosił 10s. Na podstawie wartości HR opis treningu dzielony jest przez system jako trening o wysokiej (>180bpm), średniej (110-180bpm) i niskiej (<180bpm) intensywności. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie wstępnej analizy wariancji i porównanie treningów w celu zbadania stałych wpływów ośrodka treningowego/jeźdźcy i grupy koni. Więcej informacji o tym, jak system Seaver przetwarza i analizuje dane IMU, można znaleźć w przewodniku użytkownika i informacjach patentowych Seaver (<https://seaverhorse.com>, pat.US2020/0196901PCT/EP2018/068812).

5.2.WPŁYW STRUKTURY PRZESZKODY I PARAMETRÓW PARKURU NA PARAMETRY BIOMECHANICZNE SKOKU

Zbadano 12 sportowych koni gorącokrwistych (wałachów i klaczy), w wieku od 5 do 11 lat ($171,5 \pm 4,25$ cm wzrostu w kłębie; $589,8 \pm 19$ kg wagi) regularnie trenujących skoki przez przeszkody w dwóch ośrodkach jeździeckich, podczas typowych codziennych treningów na parkurze ustawionym w krytej ujeżdżalni (25×60m). Stawkę koni, oceniono więc pod dwoma jeźdźcami – jeden ośrodek jeden jeździec. Każdy jeździec miał konie w różnych grupach wiekowych. Konie były pod stałą opieką weterynaryjną, a w ocenie jeźdźców i trenerów w dniu treningu były zdrowe (bez objawów chorobowych). Jeźdźcy, którzy dosiadali koni to mężczyźni mierzący 178 i 183 cm wzrostu, przy kolejno 79 i 84 kg wagi. Podczas całego treningu (okresu badanego i pozostałego) konie pracowały średnio ok. 4 km i pokonywały 25 przeszkód. Wszystkie dane zostały zebrane podczas jednej sesji skoków. Całkowity czas treningu wynosił około 40 minut (sd=7) przy średniej prędkości 16,08 km/h (sd=3,28). Tętno podczas treningu osiągało wartości 107-186 bpm (uderzeń na minutę).

Na potrzeby badań zwierzęta podzielono na 3 grupy ze względu na wiek i doświadczenie startowe: 5-6-letnie bez żadnego doświadczenia startowego (grupa o niskim zaawansowaniu – NZ - 3 konie), 5-6 - letnie z doświadczeniem startowym (średnio zaawansowane - ŚZ - 4 konie) oraz powyżej 6 lat z doświadczeniem startowym (wysoko zaawansowane - WZ - 5 koni). Wszystkie konie uznane za posiadające doświadczenie startowe wystartowały w co najmniej 5 zawodach rangi krajowej w klasach L-P (przeszkody o wysokościach 100-110cm).

Badana struktura dotyczyła różnic wysokości i typu przeszkody od 80 do 140 cm i szerokości 90 cm. Przeszkody badane w badaniu podzielono na trzy grupy wysokości: mniejsze niż 100 cm, pomiędzy 100 a 120 cm oraz wyższe niż 120 cm. Dla grupy koni NZ przeanalizowano 18 skoków na stacjonacie i 10 na okserze, dla ŚZ 24 skoki „wysokie” i 14 „szerokich” oraz dla WZ kolejno 36 i 14 skoków (Publikacja 2; Tabela 2). Badane przeszkody ustawiono na torze jako pojedyncze, a jeźdźców poproszono o wykonanie skoku z najazdem na środek przeszkody czyli prostopadle do jej frontu. Koń przeskakiwał przez różne rodzaje przeszkód (pionowe/ szerokie) oraz wysokości przeszkód na parkurze w ramach trasy wybranej indywidualnie przez jeźdźca (co umożliwiło analizę wpływów; typ przeszkody, numer skoku, wysokość). Zawodnicy losowo wybierali przeszkody. Przeszkody zbudowane były z drągów jako pojedyncze przeszkody (bez szeregów). Charakterystyka wybranych przez zawodnika przeszkód na trasie (wysokość i rodzaj) była monitorowana

i odnotowywana. Szczegóły trasy pokonanej przez każdego konia i jeźdźca zostały odnotowane jako potencjalne czynniki mogące mieć wpływ na parametry skoków i posłużyły do korekty danych w modelu statystycznym.

Analizie poddano tylko wystandaryzowaną liczbę 10-ciu skoków badanego treningu koni od skoku 6-stego do 15-stego, ponieważ ze wszystkich grup wykluczono pierwsze pięć skoków rozgrzewkowych. Łączna liczba obserwacji wykorzystanych do analizy statystycznej wyniosła 116 skoków (konie wykonały 4-ry skoki ze zrzutką, które nie były brane pod uwagę).

Dla każdego skoku analizowano następujące parametry biomechaniczne (Publikacja 2; Tabela 1):

- wysokość [cm]- wysokość skoku nad przeszkodą w miejscu usytuowania urządzenia;
- długość [cm]-odległość między tylnymi kończynami podczas odbicia i przednimi podczas lądowania;
- rezerwę [cm]- różnica między wysokością skoku a wysokością przeszkody;
- częstotliwość kroków podczas podejścia do przeszkody [kroki/min]- częstotliwość pięciu kroków przed skokiem;
- kąt odbicia [°]- kąt pomiędzy podłożem a wierzchołkiem paraboli skoku;
- przyspieszenie przy odbiciu [g]- pionowe przyspieszenie podczas odbicia ;
- prędkość przy odbiciu [km/h]- prędkość w fazie wznoszenia,
- przesunięcie przestrzenne ciała konia [°]- różnica orientacji przestrzennej ciała konia podczas startu i lądowania;
- energia przy lądowaniu [kJ]- energia zaabsorbowana przez kończyny konia podczas lądowania.

Prawie wszystkie parametry skoku zostały automatycznie obliczone przez system/oprogramowanie IMU, natomiast rezerwa skoku (cm) została obliczona oddzielnie na podstawie wysokości skoku i wysokości przeszkody.

5.3. KORELACJE POMIĘDZY CECHAMI

W kolejnej części oprócz zbadanych w części pierwszej parametrów skokowych przeanalizowano także monitorowane parametry ruchowe (179 obserwacji) badanych 12 koni. Urządzenie zmierzyło parametry treningowe opisujące jazdę, kondycję, chody i skoki. Parametry skokowe i analiza ich zmienności stanowiły część pierwszą pracy opisaną wyżej. Konie trenowały średnio 16,69 minuty (sd=4,25) w stępie, 18,34 (sd=1,45) w kłusie i 2,15 (sd=1,75) w galopie. Łącznie konie trenowano w 52% na wprost, 25% w lewo i 23% w prawo. Te kierunki pracy były prawie identyczne dla kłusa i stępa, z wyjątkiem galopu, gdzie kierunek prosty stanowił 45%, lewy 30% i prawy 25% czasu spędzonego w tym chodzie.

Dla charakterystyki ruchu zmierzono następujące parametry i przedstawiono w postaci średniej dla wykonanych chodów (Publikacja 3; Tabela 2).

- częstotliwość kroku stępa, kłusa i galopu [kroki/min]– liczba kroków na minutę;
- uniesienie w stępie, kłusie i galopie [cm]– przemieszczenie pionowe ciała konia podczas chodu;
- regularność ruchu w stępie, kłusie i galopie [%] – podobieństwo częstotliwości w każdym chodzie;
- symetria kłusa [bez jednostki]– stosunek średniej częstotliwości kroku lewej do prawej kończyny.

6. ANALIZA STATYSTYCZNA

Do opracowania statystycznego wyników wykorzystano oprogramowanie SAS (wersja 9.4). Statystyki opisowe i test normalności rozkładu przeprowadzono przy użyciu procedury Univariate. Informacje o treningu (tętna, liczba pokonanych przeszkód i trasa), zostały przeanalizowane statystycznie jako wstępna, podstawowa charakterystyka szkolenia i porównane między jeźdźcami - ośrodkami i grupami koni za pomocą analizy wariancji z użyciem procedury GLM programu SAS. Wstępna analiza wariancji z jeźdźcem/ośrodkiem i czynnikiem wieku w modelu nie wykazały statystycznie istotnych różnic między końmi pod względem większości cech treningowych (tętno, przebyty dystans, liczba skoków, intensywność treningu - niska (<110 bpm) i wysoka (>180 bpm), za wyjątkiem całkowitego czasu trwania treningu i czasu treningu o średniej intensywności (110-180 bpm). Wpływ ośrodka treningowego/jeźdźca został uwzględniony w końcowej analizie parametrów skoków.

6.1. ANALIZA STATYSTYCZNA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA PARAMETRY SKOKOWE

Analizę statystyczną badanych parametrów skoków przeprowadzono metodą analizy wariancji przy użyciu procedury Mixed. W analizie uwzględniono losowy wpływ konia w ośrodkach treningowych (zagnieżdżony) oraz stały wpływ grupy wiekowej (NZ, SZ, WZ), kolejnego numeru skoku (6–15), rodzaju przeszkody (pionowa, szeroka), wysokości przeszkody ($\leq 100\text{cm}$, 101-120cm, $>120\text{cm}$) oraz centrum treningowego jeźdźca (1-2). Do oceny różnic pomiędzy poszczególnymi klasami czynników zastosowano test post hoc dla LSM.

6.2. ANALIZA KORELACJI MIĘDZY PARAMETRAMI SKOKU I CHODU

Ponieważ parametry skokowe zależne były od wielu czynników związek między parametrami skokowymi i ruchowymi analizowano za pomocą korelacji cząstkowych. Oszacowano je za pomocą programu SAS procedury GLM z zastosowaniem opcji Manova. Tak uzyskane korelacje są poprawione na czynniki wpływające na te parametry. Korelacje między cechami skoku w obrębie parametrów skokowych i między cechami chodów w obrębie parametrów ruchu oszacowano za pomocą korelacji prostych, procedury CORR w programie SAS.

7. WYNIKI

7.1. WPLYW STRUKTURY PRZESZKODY I PARAMETRÓW PARKURU NA PARAMETRY BIOMECHANICZNE SKOKU

Wysokość przeszkody miała wpływ na większość parametrów. Wysokość skoku wzrastała wraz z wysokością przeszkody, przy różnicach od 14% do 17% pomiędzy obserwowanymi klasami przeszkód. Długość skoku wzrosła do 43% ($p < 0,0001$) przy wyższych wysokościach przeszkody. Kąt odbicia również wzrastał wraz z wysokością przeszkody ($p = 0,002$) do 32%. Zgodnie z oczekiwaniami przyspieszenie odbicia wzrosło ($p < 0,001$) wraz z wysokością przeszkody, przy czym największa różnica 27% wystąpiła pomiędzy najniższą i najwyższą klasą przeszkód. Wzrosła prędkość przy odbiciu ($p = 0,015$) wraz z wysokością przeszkody o około 22%. Przemieszczenie przestrzenne ciała konia nad przeszkodą podczas fazy lotu spadało ($p = 0,009$) wraz z wysokością przeszkody, tak więc wyższe skoki były mniej prostopadłe do przeszkody. Energia podczas lądowania wzrastała najmocniej ze wszystkich badanych parametrów (do 150%) wraz z wysokością przeszkody ($p = 0,0001$). Rodzaj przeszkody nie był istotny statystycznie dla żadnego z mierzonych parametrów (Publikacja 2; Tabela 5).

Wpływ kolejnego skoku był istotny dla niektórych parametrów związanych głównie z wielkością skoku (rezerwa, wysokość i długość). Rezerwa skoków zwiększała się ($p = 0,0003$) do 8-mego skoku, potem malała. Podobny kierunek zmian zaobserwowano dla długości ($p = 0,03$) i wysokości skoku, przy czym skok 9-ty był najdłuższy, a 8-my najwyższy. Największe przyspieszenie ($p = 0,0089$) i najwyższą energię absorbowaną podczas lądowania ($p = 0,02$) zaobserwowano również dla 8-mego skoku. Najwięcej statystycznie istotnych różnic odnotowano między 8-mym, 9-tym, 14-tym i 15-tym skokiem. Skok numer 8 okazał się najwyższy, z największą rezerwą ($p = 0,0003$). Przyspieszenie odbicia zmniejszało się od 8-mego skoku z każdym kolejnym skokiem. Energia lądowania była najniższa przy 14-stym skoku ($p = 0,002$) (Publikacja 2; Tabela 7).

W przypadku wpływu wieku i doświadczenia grupa NZ (koni 5 - i 6 - letnich bez doświadczenia startowego) różniła się wysokością skoku statystycznie bardziej istotnie od koni ŚZ ($p < 0,01$) niż z grupy WZ ($p < 0,05$). Grupa ŚZ miała skoki niższe o około 8% niż pozostałe młode konie (NZ), a WZ uzyskała wyniki o około 6% niższe niż NZ. Doświadczone konie (WZ i ŚZ) nie różniły się wysokością skoku. Podobne różnice między grupami zaobserwowano

dla przyspieszenia odbicia. Konie z doświadczeniem (ŚZ, WZ) charakteryzowały się mniejszym przyspieszeniem odbicia (5%-7%) niż konie bez doświadczenia (NZ). Częstotliwość kroków podejścia była najniższa w grupie ŚZ i różniła się istotnie statystycznie (26%–34%) od pozostałych grup. Konie bez doświadczenia zawodniczego (NZ) różniły się istotnie ($p < 0,01$) energią podczas lądowania od koni z doświadczeniem (ŚZ, WZ). Doświadczone konie (WZ, ŚŻ) lądowały z mniejszą energią (14%–22%) (Publikacja 2; Tabela 4).

7.2. KORELACJE POMIĘDZY CECHAMI

Większość parametrów skoków charakteryzowała się umiarkowaną zmiennością (Publikacja 2; Tabela 1). Rezerwa skoku wykazywała większą zmienność. Przesunięcie przestrzenne jest parametrem niezwykle zmiennym; wydaje się jednak, że jest to związane z charakterystyką przeszkody. Zmienność parametrów chodu była niewielka, za wyjątkiem uniesienia w stępie. Zmienność cech ma wpływ na zakres korelacji.

7.2.1. Korelacje pomiędzy cechami skoku

Zależności między parametrami skokowymi mieszczą się w szerokim zakresie wartości -0,91 do 0,98 i zostały zaprezentowane w Publikacji 3; Tabela 3. Niektóre z nich wydają się przewidywalne, jak na przykład związki między energią a przyspieszeniem (0,98; $p=0,0001$), inne są mniej oczywiste, np. energia przy lądowaniu i prędkość przy podejściu (0,57; $p=0,0001$). W przypadku parametrów charakteryzujących wielkość skoku - wysokość skoku jest silnie skorelowana z jego długością (0,67; $p=0,0001$). Rezerwa skoku jest znacznie bardziej związana z wysokością skoku (0,51; $p=0,0001$) niż z długością (0,31; $p=0,0002$). Wydaje się naturalne, że kąt przy odbiciu jest silnie dodatnio skorelowany z wysokością skoku (0,52; $p=0,0001$) i wykazuje niską korelację ujemną z długością skoku (-0,19; $p=0,04$). Przyspieszenie przy odbiciu i energia lądowania są bardzo silnie skorelowane z wysokością skoku (oba wyniki 0,95; $p=0,0001$) i długością (0,73-0,80; $p=0,0001$).

Korelacje nie są tak silne między prędkością a wysokością skoku (0,43; $p=0,0001$). Symetria odbicia wykazuje słabą korelację z wysokością skoku (0,21; $p=0,01$) i kątem odbicia (0,28; $p=0,007$); natomiast jest prawie odwrotną wartością jak przesunięcie przestrzenne (-0,91; $p=0,0001$). Jedynym parametrem skoku nie związanym z żadnym innym parametrem skoku jest częstotliwość kroków podczas odbicia.

7.2.2. Korelacje pomiędzy cechami chodów

Korelacje między parametrami ruchu są nieco niższe niż w przypadku skoków. Ich zakres mieści się w przedziale od -0,64 do 0,78, a wartości zaprezentowane zostały w Publikacji 3; Tabela 4. Najwyższe korelacje stwierdzono między częstotliwościami a regularnością dla chodów symetrycznych (stęp i kłus) (0,7-0,78; $p=0,0001$). Taka korelacja między regularnością galopu a częstotliwością galopu była znacznie mniejsza i wynosiła 0,27 ($p=0,004$). Warto zauważyć, że korelacja pomiędzy częstotliwością stępa i regularnością galopu była silna i ujemna (-0,63; $p=0,0001$). Pozostałe zależności między częstotliwością a regularnością różnych chodów były dodatnie i w większości niskie. Korelacje między częstotliwościami różnych chodów nie były istotne statystycznie. Większość korelacji między częstotliwościami chodu a uniesieniem w chodzie była stosunkowo wysoka i ujemna. Zależności regularności między chodami nie były istotne statystycznie, z wyjątkiem korelacji między stępem a galopem, która była umiarkowana i ujemna (-0,39; $p=0,0001$). Uniesienie w galopie było skorelowane na poziomie 0,21 ($p=0,02$) z uniesieniem w kłusie i 0,59 ($p=0,0001$) z uniesieniem w stępie. Uniesienie kończyn w stępie i kłusie były niezależne.

7.2.3. Korelacje pomiędzy cechami skoku i chodów

Korelacje między parametrami chodu i skoków są istotne statystycznie dla 21 korelacji z 100 możliwych, jednak większość z nich była słaba, uzyskano jedynie parę średnich wartości korelacji powyżej 0,3 (Publikacja 3; Tabela 5). Korelacje te stwierdzono dla regularności stępa i wysokości skoku (0,33; $p=0,003$), przyspieszenia odbicia (0,36; $p=0,008$) oraz energii przy lądowaniu (0,35; $p=0,02$). Uzyskano umiarkowaną korelację między częstotliwością kroków w galopie, a częstotliwością kroków podejścia (0,44; $p=0,006$). Regularność galopu wykazała niską korelację (0,19; $p=0,003$) z częstotliwością kroków podczas podejścia. Stwierdzono ujemne korelacje parametrów skoku i charakterystyki galopu między regularnością galopu a wysokością skoku (-0,24; $p=0,003$) oraz uniesieniem w galopie i częstotliwością kroków podejścia (-0,16; $p=0,004$).

Niskie dodatnie korelacje (0,24-0,29; $p<0,007$) uzyskano dla parametrów częstotliwości stępa i przyspieszenia przy odbiciu oraz regularności stępa i innych parametrów skoków (0,20-0,35; $p\leq 0,01$). Niskie ujemne korelacje odnotowano dla parametrów uniesienia w czasie chodów i parametrów skoków w zakresie od -0,16 do -0,25 ($p\leq 0,03$). Istotne statystycznie słabe korelacje między parametrami skoku i kłusa odnotowano tylko dla dwóch parametrów.

W konsekwencji częstotliwość kroków podejścia była parametrem skoku związanym najmocniej z parametrami chodu. Parametry wielkości skoku (wysokość, rezerwa, długość) korelowały głównie na niskim poziomie z regularnością stępa. Parametry dynamiczne, tj. przyspieszenie, prędkość i energia przy lądowaniu były również w większości słabo dodatnio związane z regularnością stępa i słabo ujemnie skorelowane z wysokością uniesienia w stępie. Regularność chodów była słabo powiązana z większością parametrów skokowych, najwyższą, umiarkowaną korelację zaobserwowano między częstotliwością galopu a częstotliwością kroków podczas podejścia do przeszkody.

8. Dyskusja

8.1. Wpływ struktury przeszkody i parametrów parkuru na parametry biomechaniczne skoku

Wstępna analiza treningu wykazała porównywalne metody treningu i umiejętności jeźdźców w ośrodkach jeździeckich ujętych w badaniach. Wyniki pokazują, że wpływ wieku - doświadczenia koni miał istotny wpływ na wiele parametrów skokowych. Dane zostały przeanalizowane przy pomocy analizy wariancji, która wprowadzała korektę na zróżnicowaną liczbę skoków w poszczególnych grupach koni. Konie najmłodsze i najmniej doświadczone oddały mniej skoków na najniższych wysokościach przeszkód. Informacja ta wydaje się być ważna w kontekście planu treningu, gdyż doświadczeni jeźdźcy na niedoświadczonych koniach wykonywali skoki na wyższych przeszkodach i eliminowali skoki na mniejszych wysokościach. Zjawisko to jest związane z oszczędzaniem młodych, wchodzących w sport koni, polegającym na trenowaniu odpowiedniej wysokości skoków przy zachowaniu „świeżości” skoków.

Parametry skoków zmieniają się wraz z wiekiem i doświadczeniem. Jest to zgodne z wymaganiami treningowymi, ponieważ trudniejsze przejazdy konkursowe są zwykle przeznaczone dla koni starszych i bardziej zaawansowanych w procesie szkolenia. Bardziej doświadczone konie lepiej radzą sobie z wymaganiami parkuru, ponieważ są anatomicznie i fizjologicznie przygotowane do podjęcia tego typu wyzwań. W miarę rozwoju mięśni i postępów w treningu konie mogą podchodzić do przeszkody wolniej, z mniejszym przyspieszeniem i prędkością odbicia, absorbując mniej energii przy lądowaniu, co ma ogromne znaczenie dla zdrowia ścięgien (Rietbroek i wsp. 2007). Konie bardziej doświadczone potrafią skakać „ekonomicznie”, maksymalnie dostosowując wysokość skoku do wysokości przeszkody. Często ma to też związek ze stopniem zaawansowania treningowego, ponieważ konie „zapoznane” z przeszkodami przestają wyskakiwać przesadnie w górę w fazie odbicia, jest to związane z redukcją reakcji lękowych (von Borstel i wsp. 2010).

Uzyskane wraz z wiekiem zmiany parametrów skokowych wydają się pozytywnymi reakcjami na trening i są związane z rosnącym zaufaniem zwierzęcia do człowieka. W treningu koni bardziej doświadczonych parametry skokowe charakteryzują się mniejszą zmiennością, co może mieć związek z nabytą umiejętnością skracania i wydłużania folee galopu. Możliwym jest także, że konie sklasyfikowane do grupy średnio doświadczonych będą uzyskiwały bardziej

indywidualne wartości. Ich wyniki nie zawsze mieszczą się pośrodku skali obserwowanych wyników. Większość badanych parametrów skoku zmieniała się wraz z wysokością przeszkody i wydaje się naturalne, że parabola lotu (długość skoku i kąt odbicia w naszym badaniu) musi pasować do konstrukcji przeszkody.

Wyniki pracy potwierdziły wcześniejsze wyniki, że czas lotu nad przeszkodą wzrasta wraz z jej wysokością (Clayton i Barlow 1989). Wcześniejsze badania, które dotyczyły różnej konstrukcji przeszkód nie stwierdziły wpływu struktury przeszkód na reakcje mięśniowe i kinematyczne (Guillaume i wsp. 2021). Uzyskane w pracy wyniki badań są zgodne z przedstawionymi przez inne zespoły badawcze (Clayton i wsp. 2021). Typ przeszkody nie miał wpływu na uzyskiwane parametry skoku, jednak może mieć to związek z warunkami badania. Konie badano w normalnych roboczych warunkach ich pracy na przeszkodach wcześniej poznanych przez konie. Taka sytuacja może prowadzić do zwiększonej odwagi i mniejszego podekscytowania przeszkodą w skokach dla wszystkich grup koni. Podobnie szerokość badanej przeszkody nie była duża (90 cm), co mogło prowadzić do takich wyników.

Zgodnie z wcześniejszymi badaniami kolejny numer skoku miał istotny wpływ na niektóre badane parametry skoku (Lewczuk 2008). Prezentowane badania pokazały, że przyspieszenie przy odbiciu i rezerwa nad przeszkodą zmniejszają się z każdym kolejnym skokiem (po 8-mym skoku), co mogło być spowodowane większym wydatkiem energetycznym koni w miarę upływu treningu. Zmiany wydają się być związane ze zmęczeniem występującym podczas kolejnych skoków. Udowodniono, że „koszt skoku” oszacowany na podstawie pomiaru tętna będzie rósł wraz z wysiłkiem (Schroter i wsp. 1996). Różnice w parametrach biomechanicznych koni mogą pojawiać się w wielu sytuacjach podczas całego procesu treningowego, gdyż mogą na to wpływać ich predyspozycje genetyczne (Cassiat i wsp. 2004). Indywidualne różnice, jak również ogólna odpowiedź biomechaniczna organizmu konia na poszczególne zasady szkolenia, powinny być dalej badane. Ułatwi to opracowanie naukowo potwierdzonych programów szkoleniowych dla różnych wiekowi koni, tak aby były one powszechnie dostępne.

W procesie szkolenia konie uczą się wykonywania zadań w sposób bardziej powtarzalny, co przejawia się w obserwowanym w tym badaniu zmniejszeniu zmienności, a także wyższych współczynnikach powtarzalności mierzonych parametrów skokowych obserwowanych u koni młodszych, dłużej trenowanych i ocenianych jako lepsze (Lewczuk i Ducro 2012).

8.2. KORELACJE POMIĘDZY CECHAMI SKOKU I CHODU

Parametry skoków są ze sobą silnie powiązane, a niektóre korelacje wydają się oczywiste na gruncie fizyki ogólnej (prędkość – przyspieszenie – energia). Wystąpiły także zależności mniej oczekiwane np. silniejsza korelacja rezerwy skoku z długością skoku niż z wysokością skoku. Ujemne korelacje prędkości skoku z kątem odbicia wydają się zgodne z zasadami skoków i wytycznymi treningowymi, gdyż konie (zwłaszcza starsze z wystarczającą siłą i równowagą) skaczące z mniejszą prędkością zazwyczaj mogą odbić się bliżej przeszkody, tak więc kąt odbicia jest większy. Inne zbadane relacje cech skokowych, takie jak korelacje przesunięć przestrzennych nad przeszkodą z innymi cechami wydają się mniej oczywiste. Są w większości ujemnie skorelowane z wieloma cechami. Najsilniejsza ujemna korelacja tej cechy dotyczy symetrii odbicia i korelacja ta wydaje się uzasadniona, ponieważ większe obciążenie jednej kończyny przy odbiciu może powodować nieregularność w ruchu. Także technika jeźdźca może wpływać na charakterystykę przestrzenną skoku i wynikające z niego parametry skoku. Trudno szerzej omówić tę cechę, ponieważ nie była ona wcześniej badana. Stopień zaawansowania treningu, a także szczególne warunki treningu również mogą wpływać na wartości opisywanych parametrów (Lewczuk 2008).

Badania opisujące zależności między cechami skokowymi i ujeżdżeniowymi opierały się głównie na korelacjach między ocenami liniowymi cech na poziomie genetycznym. Niektóre wyniki są zaskakujące. Wszystkie oceniane podczas badań cechy liniowe skoków swobodnych były ujemnie skorelowane na poziomie genetycznym ze zdolnością skokową skokową (Rovere et. al. 2017). Możliwym wyjaśnieniem takich wyników może być wpływ treningu, ponieważ cechy te rejestrowano bez jeźdźców. Jednak subiektywnie oceniane cechy swobodnego skoku są silnie skorelowane z wynikami skoków (Hellsten i wsp. 2006). Wyniki uzyskane w badaniach własnych dla przyspieszenia odbicia i energii pochłanianej podczas lądowania korelują z rezerwą skoku na poziomie 0,5, podobnie jak w badaniach cech skokowych ocenianych liniowo (Meideiros i wsp. 2020). W prezentowanych badaniach długość skoku jest istotnie skorelowana (>0.6) z cechami: wysokością skoku, przyspieszeniem odbicia, prędkością i energią przy lądowaniu. Nieoczekiwanie stwierdzono brak korelacji między cechami galopu a długością skoku, co nie jest zgodne z wynikami Medeiros i współautorów. Można te rozbieżności tłumaczyć tym, że konie biorące udział w badaniu są wyspecjalizowanymi końmi skokowymi, a nie młodymi ogierami opisanymi w cytowanej pracy, więc potencjał chodu koni sportowych wykazuje szerszy zakres.

Uzyskane wyniki pracy dowodzą, że charakterystyka kłusa i stępa jest skorelowana, podczas gdy galop jest mniej skorelowany z tymi chodami, co z kolei potwierdziły wyżej cytowane badania Meideiros. Częstotliwość i regularność chodów oceniane w badaniach są silnie skorelowane dla stępa i kłusa, czego nie wykazano w przypadku galopu, co może mieć związek z symetrycznością chodów (Clayton 2016). Badania dotyczące symetrii i regularności kłusa przeprowadzone przez Lewczuk i Maśko wykazywały wysoka korelację tych parametrów, natomiast prezentowane badania jej nie wykazały, jednak wyjaśnienie wynika z różnego rodzaju warunków prezentacji tych chodów (Lewczuk i Maśko 2021).

Dla podstawowych parametrów skoku jakimi są wysokość i długość (Janczarek i wsp. 2013) przeprowadzone badanie wykazało korelację wysokości skoku z regularnością i częstotliwością stępa. Zaobserwowano niską ujemną korelację między wysokością skoku a regularnością galopu. Taki wynik wskazuje, że pary koń - jeździec często wykonują „mocny, wysoki” skok kosztem utraty regularności kroków w podejściu do przeszkody. Taka sytuacja może mieć również miejsce, gdy koń boi się przeszkody, w wyniku czego koń zwalnia i skacze za wysoko.

W prezentowanych badaniach rezerwa skoku była nisko skorelowana z regularnością stępa. Regularność i częstotliwość stępa były również związane z długością skoku (0,2-0,3). Te dodatnie korelacje między rezerwą skokową a długością i regularnością stępa mogą wskazywać na to, że parametry skoku są związane ze stanem zdrowia, chociaż nie jest to związek na silnym poziomie. Wysoka regularność i symetria chodów konia świadczy o dobrym stanie zdrowia (Barrey i wsp. 1994). Prawdopodobnie dlatego regularność chodów, głównie regularność stępa, jest powiązana z cechami skokowymi na poziomie 0,3 (przyspieszenie odbicia; energia przy lądowaniu). Może to być również związane z temperamentem konia, ponieważ niektóre prace podkreślają związek między skokami a temperamentem (Ruhlman i wsp. 2009). Przesunięcia przestrzenne podczas fazy lotu w skoku korelowała z częstotliwością kroków kłusa (0,2). Wynik ten może być związany z postępami treningowymi. Im koń bardziej doświadczony (o czym świadczy mniejsza częstotliwość kroków w kłusie), tym mniejszy problem z symetrią skoku, co może wiązać się z przyjmowaniem „pomocy” jeźdźca i reagowaniem na jego pozycję ciała.

Ograniczenia wnioskowania na podstawie przeprowadzonych badań wiążą się z małą liczebnością koni. Trudno znaleźć wielu wysokiej klasy jeźdźców i konie w różnym wieku trenowane w porównywalnych warunkach środowiskowych. Dalsze badania powinny

rozwiązać ten problem. Drugie ograniczenie wiąże się z nieznanym błędem pomiarów Seavera. Oczekuje się natomiast, że urządzenie produkowane komercyjnie będzie generować ten sam błąd przy każdym użyciu, więc dane otrzymane dla tego samego sprzętu będą w pełni porównywalne. Wszystkie grupy i konie zostały zmierzone przy użyciu tego samego urządzenia, a możliwy błąd pomiaru jest taki sam dla wszystkich koni. Omówione ograniczenia wpływają na moc wyników, które należy traktować jako wstępne. Przyszłe badania skorzystałyby na naukowej walidacji systemu Seaver. Jednak do takiego procesu potrzebne jest dobrze wyposażone laboratorium biomechaniczne koni.

9. PODSUMOWANIE

Spośród badanych czynników środowiskowych opisujących warunki parkuru skokowego trzy miały istotny wpływ na analizowane charakterystyki skoku. Wysokość przeszkody, odzwierciedlająca parametry parkuru, miała największy wpływ i wpłynęła na większość parametrów skoków. W zakresie wysokości przeszkód 80-140 cm największe zmiany odnotowano dla energii lądowania (150%), długości skoku (43%), kąta odbicia (32%). Wysokość skoku, prędkość odbicia, przyspieszenie ulegały mniejszym zmianom (do 30%). Omawiane wartości wzrastały wraz z wysokością przeszkody. W przeciwieństwie do wysokości przeszkody, rodzaj przeszkody będący charakterystyką struktury przeszkody nie miał wpływu na żaden z parametrów. Następnym badanym wpływem - kolejny skok miał istotny wpływ na ponad połowę parametrów skokowych i optymalne wartości utrzymywały się głównie do 8-mego skoku. Część zmian powyższych parametrów pokrywa się z obserwacjami uzyskanymi za pomocą innych systemów analizy skoków koni, co pozwala sądzić, że zastosowany po raz pierwszy w badaniach skokowych w treningu roboczym system IMU spełnia pokładane w nim oczekiwania. System ten pozwala także na stosunkowo proste określenie pomiarów dynamicznych, co do tej pory nie było łatwo osiągalne. Pozwala także na określenie nowych parametrów jak – przemieszczenie w locie nad przeszkodą, które do tej pory nie było badane.

Dotychczasowe badania biomechaniczne obejmowały obserwacje i doświadczenia na różnych grupach koni (od źrebiąt do koni olimpijskich), nie spotkano natomiast w literaturze badań biomechanicznych koni w różnym wieku i o różnym doświadczeniu badanych w tych samych warunkach środowiskowych. Grupa wiekowo-doświadczeniowa miała istotny wpływ na wysokość skoku, przyspieszenie odbicia, częstotliwość kroków podejścia oraz energię przy lądowaniu. Podsumowując wyniki należy podkreślić, że młodsze i mniej doświadczone konie skakały wyżej od pozostałych. Błędy standardowe dla wszystkich parametrów osiągnęły wyższe wartości u koni najmłodszych, niedoświadczonych. Zmienność mierzona błędami standardowymi parametrów skoku była o około 35% większa u niedoświadczonych młodych koni (poza przyspieszeniem odbicia – 50% i energią przy lądowaniu – 44%) niż u koni starszych, bardzo doświadczonych. Błędy standardowe parametrów skokowych dla młodszych, średnio doświadczonych koni były ok. 15% wyższe w porównaniu z grupą koni bardzo doświadczonych. Potwierdzono tym samym pierwszą hipotezę badawczą.

Prezentowane wyniki badań koncentrują się na danych zebranych w naturalnych warunkach pracy konia. Konie można porównywać w codziennych wynikach treningów oceniając zmiany i postępy parametrów biomechanicznych. Taki monitoring umożliwia także stałą kontrolę dobrostanu i kwestii fizjologicznych. Większość naukowców testowała biomechanikę skoków koni w warunkach eksperymentalnych z kilkoma próbami na tej samej przeszkodzie. Zwykle używany sprzęt (np. złoty standard analizy obrazu wideo, płyty siłowe) może być używany w warunkach laboratoryjnych lub w ograniczonym obszarze kalibracji systemu, podczas gdy inne (systemy z wieloma czujnikami, podkowy z czujnikami) mogą wpływać na naturalność ruchu. Obecnie badania nad ruchem skaczących koni nie obejmują kompleksowych danych uzyskanych za pomocą komercyjnych urządzeń, istnieje więc potrzeba potwierdzenia naukowych danych z tych urządzeń, które powinny zostać przetestowane w wielu sytuacjach, według wielu metod treningowych. Ich dostępność i łatwość obsługi pozwalają na znacznie lepsze poznanie wyników treningu koni.

Uzyskane wyniki wskazują, że silnie skorelowane cechy skokowe opisują ściśle powiązane procesy ruchowe. Wydaje się, że pomiary ograniczonej liczby cech skoków pozwoli na przewidywanie innych parametrów skoków. Mniej skorelowane cechy różnych chodów wskazują, że ruch konia może mieć różne, niepowiązane wartości w różnych chodach. Podkreśla to potrzebę obserwacji wszystkich chodów przy wyborze przyszłego kierunku użytkowania konia.

Spośród 100 obliczonych korelacji parametrów skoku i chodu w badaniu 21 było statystycznie istotnych. Uzyskane wyniki (korelacje na poziomie pow. 0,3) potwierdzają hipotezę, że niektóre cechy chodów mają związek z jakością skoku. Regularność stępa i częstotliwość galopu to parametry ruchu w najwyższym stopniu informujące o zdolnościach skokowych. Jednak wysokość poziomu tych zależności nie pozwala na jednoznaczną prognozę zdolności skokowych na podstawie zdolności ruchowych. Korelacje te były od niskich do umiarkowanych. Wydają się szczególnie niskie dla galopu, który w doborze koni skokowych traktowany jest jako wyznacznik jakości skokowej konia. Otrzymane wyniki nie potwierdziły drugiej stawianej hipotezy badawczej. Zależności między chodami a skokami oceniane na poziomie fenotypowym wymagają dalszych badań, ponieważ ilość informacji na temat jest ograniczona, zwłaszcza jeżeli weźmiemy pod uwagę, że postęp w treningu może zmienić omawiane zależności.

Komercyjne jednostki czujników inercyjnych stają się coraz bardziej popularne. Uzyskane wyniki mogłyby posłużyć jako pierwsze dane do przewodnika jeździeckiego, który pozwoliłyby na porównanie wartości potwierdzonych naukowo z wynikami jeźdźca. Pomoże to w kontrolowaniu kierunku zmian obserwowanych w treningu oraz porównywaniu obserwowanego zakresu wartości z limitami uzyskanymi dla różnych wysokości skoków, rodzajów, czy kolejnych skoków przedstawionych w niniejszym opracowaniu. Obserwacje zmienności parametrów skoków mogą pomóc jeźdźcom sprawdzić, czy ich konie mieszczą się w określonych danych wiekowych dotyczących skoków. Kierunek obserwowanych zmian parametrów skoków na różnych wysokościach/rodzajach/konstrukcji przeszkód może zweryfikować poprawność prowadzonego szkolenia. Informacje o różnicach między pomiarami dla kolejnych skoków mogą pomóc w organizacji treningu. Każdy trening powinien zakończyć się pozytywnym osiągnięciem konia. Dane z analizy kolejnych skoków informują jeźdźców o najbardziej udanych wartościach dla każdego parametru skoku na każdym kolejnym numerze skoku. Otrzymane wyniki sugerują zatem, że rezerwę skoku i przyspieszenie odbicia należy trenować do 11-stego skoku, gdyż pierwsze dziesięć kolejnych skoków gwarantuje wyższe, czyli najbardziej pożądane wartości. Nie ma to tak dużego znaczenia w przypadku treningu poświęconemu zwiększeniu skoku, ponieważ wielkość skoku (długość i wysokość) są mniej zależne od kolejnego numeru skoku. Tak szczegółowe informacje pozwolą lepiej konstruować parkury i treningi, korzystniejsze dla konia i właścicieli oraz poprawiać dobrostan koni.

10. WNIOSKI

- o Struktura przeszkody (rodzaj przeszkody) nie miała wpływu na parametry skoku badanych koni. Parametry parkuru (wysokość przeszkody i kolejność skoku) były wysoko istotnymi czynnikami wpływającymi na biomechanikę skoku koni. W badanym zakresie wielkości przeszkód trudność parkuru zależy w większym stopniu od parametrów parkuru jak struktury.
- o Wysokość przeszkody wpływała na prawie wszystkie badane parametry skokowe, kolejność skoku na większość z nich za wyjątkiem kąta odbicia, częstotliwości kroków przy podejściu, prędkości odbicia i przemieszczenia w locie. W treningu poszczególnych charakterystyk skoków należy szczegółowo dobierać parametry parkuru.
- o W miarę dojrzewania i zaawansowania treningowego konie skakały coraz bardziej ekonomicznie obniżając parabole lotu przy zachowaniu „czystości” skoku nad przeszkodą. Charakterystyka skoku koni średnio zaawansowanych jest najtrudniejsza do oceny, ponieważ nie zawsze ich parametry skoku znajdują się w środku skali zmierzonych wartości.
- o Proces treningu umożliwia zmniejszenie przypadkowości parametru skokowego, ponieważ błędy standardowe prawie wszystkich parametrów biomechanicznych są wyższe u koni starszych i bardziej doświadczonych.
- o Wysokie korelacje pomiędzy parametrami biomechanicznymi skoków pozwalają na predykcję części parametrów skokowych na podstawie innych.
- o Parametry chodów koni są niżej ze sobą związane niż parametry skokowe koni. Wysokość korelacji nie pozwala na ocenę jakości jednego chodu na podstawie drugiego. Wysokie związki między parametrami chodów oszacowano tylko w niektórych przypadkach cech dotyczących jednego chodu.
- o Cechy biomechaniczne chodów nie pozwalają na wnioskowanie na temat cech skokowych koni, ponieważ korelacje te są słabe do średnich. Najwyższe i najwięcej związków uzyskano pomiędzy regularnością stępa i parametrami skoku oraz częstotliwością galopu i częstotliwością kroków podejścia do przeszkody.
- o Nowa metoda pomiaru skoków – IMU, dając porównywalne z literaturą wyniki dotyczące wpływów czynników, będąc dostępnym i łatwym w stosowaniu w warunkach terenowych urządzeniem, dając pomiary kinematyczne i dynamiczne, w tym nową nie podlegającą jeszcze badaniom cechą wydaje się bardzo obiecującym narzędziem do tworzenia procedur treningowych.

11. LITERATURA

1. Barrey, E., Galloux, P., 1997. Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. *Equine Veterinary Journal*, 29(S23), 45-49.
2. Barrey, E., Hermelin, M., Vaudelin, J. L., Poirel, D., Valette, J. P., 1994. Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. *Equine Veterinary Journal*, 26(S17), 7-12.
3. Becker, A. C., Stock, K. F., Distl, O., 2001. Genetic correlations between free movement and movement under rider in performance tests of German Warmblood horses. *Livestock Science*, 142(1-3), 245-252.
4. Cassiat, G., Pourcelot, P., Tavernier, L., Geiger, D., Denoix, J. M., Degueurce, D., 2004. Influence of individual competition level on back kinematics of horses jumping a vertical fence. *Equine veterinary journal*, 36(8), 748-753.
5. Clayton, H. M., 2016. Horse species symposium: Biomechanics of the exercising horse. *Journal of animal science*, 94(10), 4076-4086.
6. Clayton, H. M., Barlow, D. A., 1989. The effect of fence height and width on the limb placements of show jumping horses. *Journal of Equine Veterinary Science*, 9(4), 179-185.
7. Clayton, H. M., George, L. S., Sinclair, J., Hobbs, S. J., 2021. Characteristics of the flight arc in horses jumping three different types of fences in Olympic competition. *Journal of Equine Veterinary Science*, 104, 103698.
8. Clayton, H. M., Colborne, G. R., Burns, T. E., 1995. Kinematic analysis of successful and unsuccessful attempts to clear a water jump. *Equine Veterinary Journal*, 27(S18), 166-169.
9. Colborne, G. R., Clayton, H. M., Lanovaz, J., 1995. Factors that influence vertical velocity during take off over a water jump. *Equine Veterinary Journal*, 27(S18), 138-140.
10. Deuel, N. R., Park, J., 1991. Kinematic analysis of jumping sequences of Olympic show jumping horses. *Equine exercise physiology*, 3, 158-166.
11. Doyle, J. L., Carroll, C. J., Corbally, A. F., Fahey, A. G., 2022. An overview of international genetic evaluations of show jumping in sport horses. *Translational Animal Science*, 6(2), txac038.
12. Dutto, D. J., Hoyt, D. F., Clayton, H. M., Cogger, E. A., Wickler, S. J., 2004. Moments and power generated by the horse (*Equus caballus*) hind limb during jumping. *Journal of Experimental Biology*, 207(4), 667-674.
13. Dyson, S., Routh, J., Bondi, A., Pollard, D., 2022. Gait abnormalities and ridden horse behaviour in a convenience sample of the United Kingdom ridden sports horse and leisure horse population. *Equine Veterinary Education*, 34(2), 84-95.
14. Falaturi, P. H., Reininger, E. F., Preuschhof, H., 2001. Bewegungsanalyse bei springpferden mit hilfe der computerkinematographie. *Pferdeheilkunde*, 17, 361-368.
15. FEI Jumping Rules, 26th Edition, 2019.
16. Guillaume, J. F., Laroche, D., Babault, N., 2019. Kinematics and electromyographic activity of horse riders during various cross-country jumps in equestrian. *Sports Biomechanics*.
17. Hellsten, E. T., Viklund, Å., Koenen, E. P. C., Ricard, A., Bruns, E., Philipsson, J., 2006. Review of genetic parameters estimated at stallion and young horse performance tests and their correlations with later results in dressage and show-jumping competition. *Livestock Science*, 103(1-2), 1-12.
18. Hernlund, E., Egenvall, A., Roepstorff, L., 2010. Kinematic characteristics of hoof landing in jumping horses at elite level. *Equine Veterinary Journal*, 42, 462-467.
19. Janczarek, I., Stachurska, A., Wilk, I., 2013. Correlation between kinematic parameters of the free jumping horse in the first approach stride. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A-Animal Science*, 63(2), 57-67.
20. Leach, D. H., Ormrod, K., Clayton, H. M., 1984. Stride characteristics of horses competing in Grand Prix jumping. *American journal of veterinary research*, 45(5), 888-892.
21. Lewczuk, D., 2008. Young horse response on changing distance in free jumping combination. *animal*, 2(11), 1651-1657.
22. Lewczuk, D., Ducro, B., 2012. Repeatability of free jumping parameters on tests of different duration. *Livestock Science*, 146(1), 22-28.

23. Lewczuk, D., Maško, M., 2021. Symmetry and regularity of recreation horse during treadmill training. *Livestock Science*, 254, 104773.
24. Lewczuk, D., Metera-Zarzycka, E., 2019. Horse phenotyping based on video image analysis of jumping performance for conservation breeding. *PeerJ*, 7, e7450.
25. Lütteken, K., 2001. Vergleichende videogestützte 2D-Bewegungsanalyse von Reiter-Pferd-Kombinationen der Weltelite im Springreiten (Doctoral dissertation).
26. Maisonpierre, I. N., Sutton, M. A., Harris, P., Menzies-Gow, N., Weller, R., Pfau, T., 2019. Accelerometer activity tracking in horses and the effect of pasture management on time budget. *Equine veterinary journal*, 51(6), 840-845.
27. Medeiros, B. R., Garbade, P., Seixas, L., Peripolli, V., McManus, C., 2020. Brazilian Sport Horse: genetic parameters for approval of Brasileiro de Hipismo stallions. *Tropical Animal Health and Production*, 52, 1669-1680.
28. Meershoek, L. S., Schamhardt, H. C., Roepstorff, L., Johnston, C., 2001. Forelimb tendon loading during jump landings and the influence of fence height. *Equine Veterinary Journal*, 33(S33), 6-10.
29. Merkens, H. W., Schamhardt, H. C., Van Osch, G. J. V. M., Van den Bogert, A. J., 1991. Ground reaction force analysis of Dutch Warmblood horses at canter and jumping. *Equine exercise physiology*, 3, 128-135.
30. Powers, P., 2016. The take off kinematics of jumping horses in a puissance competition. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.
31. Rietbroek, N. J., Dingboom, E. G., Joosten, B. J., Eizema, K., Everts, M. E., 2007. Effect of show jumping training on the development of locomotory muscle in young horses. *American journal of veterinary research*, 68(11), 1232-1238.
32. Rovere, G., Ducro, B. J., van Arendonk, J. A. M., Norberg, E., Madsen, P., 2017. Genetic correlations between dressage, show jumping and studbook-entry inspection traits in a process of specialization in Dutch Warmblood horses. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 134(2), 162-171.
33. Ruhlmann, C., Janssens, S., Philipsson, J., Thorén-Hellsten, E., Crolley, H., Quinn, K., Ricard, A., 2009. Genetic correlations between horse show jumping competition traits in five European countries. *Livestock science*, 122(2-3), 234-240.
34. Schamhardt, H. C., Merkens, H. W., Vogel, V., Willekens, C., 1993. External loads on the limbs of jumping horses at take-off and landing. *American journal of veterinary research*, 54(5), 675-680.
35. Schroter, R. C., Baylis, E., Marlin, D. J., 1996. Gait, estimated net cost of transport and heat production at different speeds in Three-day-event horses. *Equine Veterinary Journal*, 28(S22), 16-23.
36. St. George, L., Hobbs, S. J., Sinclair, J., Richards, J., Roddam, H., 2019. Does equestrian knowledge and experience influence selection and training practices for showjumping horses?. *Comparative Exercise Physiology*, 15(2), 123-135.
37. Thompson, K., Clarkson, L., 2019. How owners determine if the social and behavioral needs of their horses are being met: Findings from an Australian online survey. *Journal of Veterinary Behavior*, 29, 128-133.
38. Van den Bogert, A. J., Jansen, M. O., Deuel, N. R., 1994. Kinematics of the hind limb push-off in elite show jumping horses. *Equine Veterinary Journal*, 26(S17), 80-86.
39. von Borstel, U. U., Duncan, I. J., Lundin, M. C., Keeling, L. J., 2010. Fear reactions in trained and untrained horses from dressage and show-jumping breeding lines. *Applied animal behaviour science*, 125(3-4), 124-131.
40. <https://seaverhorse.com>, pat.US2020/0196901PCT/EP2018/068812.

STRESZCZENIE

Wpływ struktury przeszkody i parametrów parkuru na biomechanikę skoku koni

mgr inż. Katarzyna Becker

Słowa kluczowe: : IMU, skoki, trening koni, chody

W ostatnich latach znacznie zwiększyły się możliwości pomiaru biomechaniki ruchu. Monitorowanie aktywności koni jest przydatne dla opiekunów, trenerów i jeźdźców, ponieważ pozwala zapewnić koniom odpowiednią opiekę zdrowotną, a także dobrą odpowiednią dietę i intensywność ćwiczeń. Jest to możliwe dzięki nowoczesnym urządzeniom do pomiaru inercji (IMU), nieinwazyjnym urządzeniom elektronicznym. Ilościowy i jakościowy monitoring aktywności koni może odgrywać kluczową rolę w zapewnieniu odpowiednich warunków bytowych i odpowiednich obciążeń treningowych. Tego typu badania są obecnie wykorzystywane na szeroką skalę w badaniach biomechanicznych koni, jak również w praktyce. Zastosowanie komercyjnych inercyjnych jednostek pomiarowych stało się popularne w sportach jeździeckich, co może przyczynić się do wyeliminowania luki w wiedzy dotyczącej wielu aspektów biomechaniki treningu. W badaniach wykorzystano system Seaver IMU do pomiaru charakterystyki skoku koni na przeszkodach o różnej budowie i parametrach, u koni w różnym wieku i o różnym doświadczeniu startowym podczas treningu roboczego. Postawiono hipotezę, że wyższy wiek i większe doświadczenie skutkują mniejszą zmiennością parametrów skoków. Oczekuje się również wysokich korelacji między chodami a charakterystyką skoku, ponieważ nawet wyspecjalizowani skoczkowie potrzebują jakości ruchu, aby spełnić wymagania czasowe. Dwanaście koni gorącokrwistych w wieku od 5 do 6 lat z doświadczeniem startowym/bez oraz w wieku od 7 do 11 lat z doświadczeniem zostało przebadanych podczas regularnego treningu w dwóch ośrodkach treningowych. Dwóch wysokiej klasy jeźdźców (po jednym w każdym ośrodku) skakało przez losowo wybrane przeszkody o znanej charakterystyce najeżdżając prostopadle do przeszkody. Analizie poddano stałą liczbę 10 kolejnych skoków indywidualnie wybranego toru przeszkód pionowych i szerokich (5-15) oraz zmierzono następujące parametry: wysokość skoku, zapas i długość; kąt odbicia, przyspieszenie, prędkość; przesunięcie przestrzenne skoku, energię przy lądowaniu i częstotliwość kroków podejścia. Urządzenie mierzyło 10 parametrów ruchu. Oceniano częstotliwość, wysokość i regularność stępa, kłusa i galopu oraz symetrię kłusa.

Wstępna analiza potwierdziła porównywalny wysiłek fizjologiczny w dwóch ośrodkach treningowych na podstawie pomiarów tętna, dystansu i czasu trwania. Konie pokonywały dystans 3-4 km pokonując maksymalnie 30 przeszkód.

Wieloczynnikowa analiza wariancji danych biomechanicznych skoków obejmowała w modelu statystycznym losowy wpływ konia oraz stałe wpływy ośrodka treningowego, grupy wiekowo-doświadczeniowej, liczby kolejnych skoków, rodzaju przeszkody i wysokości. Zależności między parametrami skoków i chodów analizowano za pomocą prostych korelacji (SAS, CORR), a korelacje cząstkowe zastosowano dla zależności między skokami a chodami (skorygowane na wpływy stałe typu i wysokości przeszkody, numer kolejnego skoku, ośrodek treningowy/jeździec i wiek konia- doświadczenie; SAS, GLM). Struktura przeszkody (rodzaj) nie miała wpływu na żadne badane parametry skokowe, natomiast parametry parkuru (wysokość przeszkody i kolejność skoku) miały istotny wpływ na parametry skoku. Wysokość przeszkody była statystycznie istotna (p od 0.0001 do 0.01) dla prawie wszystkich parametrów skokowych (za wyjątkiem częstotliwości podejścia do przeszkody i rezerwy skoku), natomiast kolejność skoku (p od 0.009 do 0.03) dla ponad połowy z nich (za wyjątkiem kąta odbicia, częstotliwości kroków podejścia, prędkości odbicia, przesunięcia w czasie skoku). Cztery parametry istotnie różniły się między młodszą, niedoświadczoną grupą a doświadczonymi młodszymi i starszymi końmi: wysokość wysoku ($p = 0,01$), częstotliwość podchodzenia ($p = 0,005$), przyspieszenie odbicia ($p = 0,01$) i energia lądowania ($p = 0,0013$). Błędy standardowe dla prawie wszystkich parametrów osiągnęły wyższe wartości u koni najmłodszych, niedoświadczonych. Zmienność parametrów skokowych była mniejsza dla doświadczonych grup koni, co sugeruje większą precyzję na torach przeszkód. Proste korelacje w zakresie parametrów skoków (-0,48 – 0,95) oraz parametrów chodów (-0,64 – 0,78) były istotne co najmniej dla $p < 0,05$. Uzyskane korelacje cząstkowe między chodami a skokami (powyżej 0,3) wykazały, że niektóre cechy chodów są związane z jakością skoku. Jednak większość korelacji cząstkowych była niska. Umiarkowane wartości odnotowano dla częstotliwości kroków podejścia do przeszkody i częstotliwości kroków galopu (0,44) oraz regularności stępu i trzech parametrów skoku (0,33-36).

ABSTRACT

Influence of obstacle structure and course parameters on the biomechanics of horse jumping

Katarzyna Becker, MSc

Key words: IMU, jumping, horse training, gaits

In recent years, the possibilities of measuring movement biomechanics have increased significantly. The monitoring of horses' activity is useful for carers, trainers and riders, because it allows them to provide the horses with appropriate health care, as well as to select appropriate diet and exercise intensity. This was made possible by modern inertia measuring devices (IMUs), non-invasive electronic devices. The quantitative and qualitative monitoring of horses' activity can play a key role in ensuring adequate living conditions and appropriate training loads. Such research is currently used on a wide scale in biomechanical studies of horses, as well in practice. The application of commercial inertial measurement units has become popular in equestrian sports, which may help to eliminate a gap of knowledge concerning many aspects of biomechanics in training. This study employed the Seaver IMU system to measure horse jumping characteristics on obstacles of different structure and parameters with differing horse age-competition experience during regular training. It was hypothesized that greater age-experience level results in lower variability of jumping parameters. As well as high correlations between gaits and jump characteristics are expected because even specialized jumpers need quality of movement to fulfill temporal performance requirements. Twelve Warmblood horses aged 5 to 6 years with/without competition experience and 7 to 11 years with experience were investigated during regular training in two training centers. Two high class riders (one in each centre) jumped randomly chosen obstacles of the known characteristics from the basic, perpendicular approach. Consistent number of 10 successive jumps of the individual chosen course of vertical and spread obstacles (5th –15th) were analyzed and the following parameters were measured: jump height, reserve and length; taking off angle, acceleration, velocity; jump spatial shifting, energy by landing, and frequency of approach strides. The device measured 10 movement parameters. Frequency, elevation and regularity of walk, trot and canter, as well as trot symmetry were available.

Preliminary analysis confirmed comparable physiological effort in two training centers based on heart rate, distance and duration measurements. Horses covered a 3-4 km

distance overcoming up to 30 obstacles. The multifactorial analysis of variance for biomechanical jumping data included in the statistical model the random effect of horse and fixed effects of training center, age-experience group, successive jump number, obstacle type and height. Relationships between parameters for jumping and gaits were analyzed using simple correlations (SAS, CORR) and partial correlations were used for relationships between jumping and gaits (corrected for fixed effects of obstacle type and height, successive jump number, training center/rider and horse age-experience; SAS, GLM). The structure of the obstacle (type) had no effect on any of the investigated jumping parameters, while the parameters of the course (obstacle height and successive jump) had a significant influence on the jumping parameters. The height of obstacle was statistically significant (p from 0.0001 to 0.01) for almost all jumping parameters (except for the frequency of approach strides and jump reserve), while the successive jump (p from 0.009 to 0.03) for more than half of them (except for the angle at taking off, frequency of approach strides, velocity of take-off, spatial shifting). Four parameters were significantly different between the younger, inexperienced group and experienced younger and older horses: height of jump ($p = .01$), frequency of approach strides ($p = .005$), acceleration of taking off ($p = .01$), and energy by landing ($p = .0013$). Standard errors for almost all the parameters reached higher values for the youngest, inexperienced horses. Variability of jumping parameters was lower for experienced groups of horses, suggesting higher precision on obstacle courses. Simple correlations within jumping parameters (-0.48 – 0.95) and within gaits parameters (-0.64 – 0.78) were significant at least for $p < 0.05$. Obtained partial correlations between gaits and jumping (above 0.3) showed that some gait characteristics are connected with jump quality. However, most partial correlations were low. Moderate values were noted for jump and canter frequencies (0.44), with walk regularity and three jumping parameters (0.33-36).

14. ZAŁĄCZNIKI

14.1. Kopie artykułów naukowych stanowiących cykl publikacji rozprawy doktorskiej

Wykorzystanie akcelerometru i żyroskopu w badaniach biomechanicznych koni

KATARZYNA BECKER, DOROTA LEWCZUK*

Katedra Hodowli Zwierząt, Wydział Hodowli i Biologii Zwierząt,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
*Instytut Genetyki i Biotechnologii Zwierząt PAN w Jastrzębcu, ul. Postępu 36a, 05-552 Magdalenka

Otrzymano 19.06.2020

Zaakceptowano 01.09.2020

Becker K., Lewczuk D.

Use of accelerometer and gyroscope in biomechanical studies of horses

Summary

In recent years, along with the available techniques, the possibilities of measuring movement biomechanics have increased significantly. The monitoring of horses' activity is useful for carers, trainers and riders, because it allows them to provide the horses with appropriate health care, as well as to select appropriate diet and exercise intensity. This was made possible by modern inertia measuring devices (IMUs), non-invasive electronic devices based on accelerometry and rotation analysis. The purpose of this study is to review biomechanical tests performed on horses by means of these devices. Measurements obtained with accelerometers and gyroscopes are used in the fields of veterinary research, behaviour analysis and training. The quantitative and qualitative monitoring of horses' activity can play a key role in ensuring adequate living conditions and appropriate training loads. The first research using these techniques was carried out as early as the 1990s. Such research is currently used on a wide scale in biomechanical studies of horses, as well as in practice. Due to the growing interest in horse riding, it has become a valuable tool in training horses and in assessing their welfare.

Keywords: IMU, accelerometer, gyroscope, biomechanics, horse training

Interdyscyplinarne wykorzystanie urządzeń do analizy przyspieszeń opiera się na wiedzy projektowej, inżynierskiej i produkcyjnej. W szerokim i różnicowanym zakresie obszarów technicznych można je znaleźć w systemach obejmujących aplikacje motoryzacyjne, medyczne, elektroniczne, komunikacyjne i obronne. Podobnie analiza ruchu oparta na analizatorach przyspieszeń stała się uznanym narzędziem w optymalizacji treningu różnych dyscyplin sportowych. Jeźdźcy i trenerzy coraz częściej korzystają ze specjalistycznych urządzeń, które pozwalają monitorować podstawowe parametry zdrowia i dobrostanu koni, a przede wszystkim szczegółowo zmierzyć parametry treningu informujące o postępach i kondycji konia. Tego typu technologie nie tylko pomagają osiągnąć wyższe wyniki w sporcie, ale także wzbogacają relację pomiędzy koniem a jeźdźcą. Urządzenia do monitorowania treningu pozwalają lepiej zrozumieć konie – wspierają jeźdźcę wymiernymi informacjami. Sport jeździecki koncentruje się na współpracy konia i jeźdźcy, pomiar parametrów treningu może istotnie wpłynąć na dobór właściwych metod i stałe monitorowanie dyspozycji fizycznej koni. Obiecujące wydaje się połączenie metod wizualnych popartych pomiarami za pomocą

akcelerometrów (15), tym bardziej, że zyskują one na popularności (44). Ilościowe monitorowanie aktywności fizycznej może być również wykorzystywane do badań profilaktyki chorób, a także w odniesieniu do określenia prawidłowości stosowanej diety koni (30). W Polsce także rozpoczęto prace zmierzające do opracowania systemu oceny ruchu zwierząt oraz pomiaru dodatkowych funkcji życiowych u krów i koni (23).

Akcelerometry są używane w pomiarach statycznego przyspieszenia grawitacyjnego pozwalającego wyznaczyć kąt odchylenia obiektu od pionu, jak również w pomiarach przyspieszenia dynamicznego na skutek ruchu, uderzenia, wstrząsów lub wibracji. Żyroskopy z kolei mierzą prędkość kątową obiektów obracających się wokół jednej z osi układu kartezjańskiego. Możliwe jest też wyznaczenie na tej podstawie wartości kąta obrotu. W zależności od ustawienia czujnik przeznaczony do pomiaru prędkości kątowej wokół jednej aktywnej osi może też mierzyć ruch wokół pozostałych dwóch (1). Od lat są one częścią wielu specjalistycznych urządzeń i systemów, np. żyroskopy pokładowe już w latach 50. ub. wieku były instalowane w lotniczych przyrządach nawigacyjnych. Nowoczesne metody analiz biomechanicznych bazują na wykorzystaniu

akcelerometrów i żyroskopów w modelu jednostek pomiaru inercji – Inertial Measurement Unit (IMU). Systemy IMU są to jednostki do nawigacji inercyjnej wyposażone najczęściej w trzyosiowe żyroskopy i trzyosiowe przyspieszeniomierze, dzięki czemu jest możliwe dokładne śledzenie orientacji obiektu w każdej z dwóch osi, pozwalając na pomiar w trzech wymiarach. Nawigacja inercyjna polega na pomiarze przyspieszeń działających na obiekt oraz prędkości kątowych w celu określenia jego orientacji i położenia.

W literaturze dotyczącej lokomocji koni wiele stwierdzeń może wręcz zadziwiać. Jednym z nich jest stwierdzenie, że koń nie jest naturalnym skoczkiem, a zwolennicy tej opinii powołują się na dane dotyczące fizjologii i anatomii (29). Na przestrzeni lat powstało wiele prac badawczych wykorzystujących rozmaite sposoby pomiarów biomechaniki ruchu koni (13, 28), dzięki którym można znaleźć odpowiedź na podobne pytania. Do jednych z najbardziej nowoczesnych należą pomiary z wykorzystaniem akcelerometrów i żyroskopów. Niniejszy artykuł przedstawia, biorąc pod uwagę ostatnie dziesięciolecie, zastosowanie akcelerometrów i żyroskopów w użytkowaniu koni przy uwzględnieniu najważniejszych czynników wpływających na przebieg badań.

Poszukiwania podstawowych zasad biomechaniki ruchu koni były jednymi z pierwszych badań wykorzystujących analizatory przyspieszeń. Akcelerometr przymocowany do kopyta był początkowo najskuteczniejszym sposobem pomiarów przemieszczeń i punktów kontaktu kopyta z podłożem. W latach dziewięćdziesiątych XX w. zastosowano przyspieszeniomierze do pomiarów kontaktu kopyta z podłożem oraz oceny skuteczności podków i wkładek amortyzujących (2). Rozwój technik pozwolił na skorelowanie użycia przyspieszeniomierza z elektromiografią powierzchniową 7 mięśni kończyny tylnej wykonane u 5 koni, co pozwoliło na poszerzenie informacji o funkcji i czasie działania poszczególnych mięśni (39). Do badań kinematycznych ruchu kłusaków przeprowadzonych w Szwecji (19, 20) oprócz akcelerometrów umieszczonych na wysokości kości śródrezcza oraz kopycie, wykorzystano także zsynchronizowaną płytę siłową oraz analizę wideo. Stwierdzono, że zwolnienie prędkości kopyta obserwowane w drugiej części fazy przemieszczania kończyny nad ziemią (29) jest ważnym czynnikiem tłumiącym wpływ sił powstających przy kontakcie kopyta z podłożem. Zbadano także, że długość tej fazy, i uzyskane zwolnienie prędkości mają istotne znaczenie dla zdrowia ortopedycznego przebadanych osobników. U 5 koni arabskich w warunkach terenowych sprawdzono występowanie zależności między charakterystyką chodów badanych przyspieszeniomierzami a zużyciem tlenu, analizowanym za pomocą przenośnego analizatora gazów oddechowych. Korelacje pomiędzy zmiennymi zużycia tlenu i chodu były istotne statystycznie i wysokie np. 0,68 dla czę-

stotliwości oddechów i częstotliwości kroków czy 0,97 dla wydechów i szybkości ruchu (9).

W celu poznania biomechaniki ruchu i reakcji fizjologicznych w czasie chodzenia w wodzie przy analizie programów rehabilitacji zbadano 9 koni bez wcześniejszego doświadczenia na bieżni wodnej i oceniano wpływ wysokości wody. Stwierdzono, że stabilny chód osiągany jest już w ciągu pierwszych sześciu sesji, przy czym chodzenie w wodzie na poziomie nadgarstka czy łokci dawało lepszą stabilność niż chodzenie w wodzie na wysokości kopyt (40). Greco-Otto i wsp. (18) dokonali analizy wpływu poziomu wody na obciążenia kończyn podczas zabiegów na bieżni wodnej u 22 koni rasy quarter horses. Trzy przyspieszeniomierze zamocowano na lewej kończynie przedniej. Konie sprawdzano przy dwóch różnych prędkościach (v_1 : 0,83 m/s, v_2 : 1,39 m/s) i trzech wysokościach wody oraz kontrolnie bez. Zanurzenie kończyn w wodzie podczas ćwiczeń zwiększyło tłumienie przyspieszeń w różnych segmentach kończyn, co wskazuje, że bieżnia wodna może mieć korzystny wpływ na proces rehabilitacji urazów kończyn. Analizę porównawczą technik pomiaru kinematycznego i akcelerometrycznego ruchu kopyta w kłusie wykonali badacze z Francji w celu sprawdzenia wpływu poślizgu kopyta na podłożu na pojawianie się problemów ortopedycznych. Cztery kłusaki francuskie wyposażone w akcelerometr poddano analizie obrazu ruchu kinematycznego. Obliczono podłużną odległość poślizgu z danych kinematycznych oraz z sygnału akcelerometru, stwierdzając porównywalność wyników na różnych powierzchniach (22).

Pomimo, że wzorce aktywności mięśni tułowia są często pomijane, mają duże znaczenie dla utrzymania właściwej postawy i kształtu ciała. Analiza biomechaniki tułowia w warunkach statycznych okazała się przydatna do prognozowania wzorców aktywności. Wykorzystano akcelerometr i elektromiografię powierzchniową (EMG) do ustalenia aktywności poszczególnych mięśni tułowia u 5 koni, badanych w trzech rodzajach chodu, w próbie pod jeźdźcem i bez siodła (27). Jednocześnie zastosowano pomiary przyspieszeń do określenia poprawności chodów, w tym kulawizn. Analizatory przyspieszeń posłużyły także do pomiarów wstrząsów w odcinku dystalnym kończyn w celu zbadania stopnia kulawizny koni z wykorzystaniem analizy symetrii wzorów przyspieszenia tułowia w kłusie i stępie (4). W innych badaniach dotyczących mechanizmów powstawania kontuzji u koni akcelerometr zamocowano na grzbietowej części kopyta. Zastosowanie wykresów konturowych pozwoliło na wizualizację czasu i lokalizację sił podczas uderzenia. Stwierdzono, że istotna energia występuje natychmiast po kontakcie kopyta z podłożem oraz zwrócono uwagę na to, że należy ostrożnie dobierać częstotliwość układów pomiarowych, aby zapobiec utracie danych (6). W badaniach dotyczących urazów kończyn u koni wyścigowych pełnej krwi określono, że momentem

krytycznym przy powstawaniu urazów kończyn przednich jest obciążenie powstające w 10-20 ms po kontakcie z podłożem (38). Kolejnego porównania wzorów fazy zwolnienia prędkości kopyt między przednimi i tylnymi kończynami w kłusie przed postawieniem na podłożu dokonano u 7 koni z wykorzystaniem przyspieszeniomierzy umieszczonych na kopytach przy jednoczesnym zastosowaniu płyt siłowych. Dane z płyt siły pokazały znacznie większy współczynnik pionowego impulsu siły (średnia \pm s.d. $6,5 \pm 5,9$ N/s) i siły poziomej ($190,4 \pm 110,2$ N) w kończynie przedniej niż w tylnej. Parametry akcelerometru wykazały brak znaczących różnic. Nie stwierdzono istotnej różnicy w zwolnieniu kopyt, wykresy ruchu wykazały wspólny wzór, który szczegółowo opisywał kinematykę przednich i tylnych kopyt w początkowej fazie hamowania (20). Keegan i wsp. (26) porównywali ocenę kulawizny koni kłusujących na bieżni i w ruchu swobodnym za pomocą dwóch akcelerometrów jednoosiowych i dwóch żyroskopowych przetworników. Identyfikowali i oznaczali ilościowo kulawizny kończyny przedniej i tylnej. Opracowali algorytmy służące do pomiaru przesunięcia głowy i miednicy. Następnie Keegan i wsp. (25) rozwinęli koncepcję i przeprowadzili kontynuację badań na bieżni, porównując wyniki akcelerometryczne i żyroskopowe z techniką wykrywania ruchu obrazu. Zbadano 8 koni, w tym dwa z chorobami stawów, które oceniono przed i po blokadach nerwowych oraz cztery z kulawizną związaną z nieprawidłowym kuciem. Algorytm kwantyfikował wykrytą kulawiznę jako asymetrię. Korelacja między wynikami systemów analizatorów przyspieszeń i techniką wykrywania obrazu była liniowa i wysoka (0,95 dla kończyny przedniej i 0,82 kończyny tylnej). Inne badania z użyciem akcelerometrów sprawdzały możliwość wykorzystania MP3 do rejestracji dźwięku ruchu konia i jego poprawności poprzez rejestrację odgłosów stawianych kopyt przednich i tylnych kończyn. Wyniki z akcelerometru potwierdziły, że nagrywarki mogą być wykorzystane do identyfikacji odstępów dźwiękowych pomiędzy kontaktem kopyt z podłożem świadczących o poprawności ruchu (37). Zbadano także możliwość porównania pomiarów z akcelerometrów z wynikami badań klinicznych przeprowadzonych przez doświadczonych lekarzy weterynarii. Zdrowe konie wyposażono w akcelerometr i rejestrowano ich ruch na video w celu subiektywnej oceny. Wyniki symetrii ruchu mierzone akcelerometrami wykazały istotny związek z oceną fachowców, co wskazuje, że analizatory przyspieszeń mogą być cennym narzędziem do wykrywania kulawizn (45). Możliwość wykorzystania akcelerometru do użytku klinicznego potwierdzono w badaniach ruchu 236 koni (24). Wyniki dotyczące pomiarów ruchów tułowia oparte na czujnikach bezwładnościowych wykazały wysoką powtarzalność asymetrii ruchu głowy i miednicy u koni kulawych kłusujących w linii prostej. Starke i wsp. (42) także

przeprowadzili doświadczenie mające na celu ocenę poprawności chodów 10 koni w stępie i w kłusie za pomocą akcelerometrów. Czujniki bezwładnościowe umieszczone na miednicy potwierdziły przydatność akcelerometrów do identyfikacji kulawizn, zaproponowano także wykorzystanie metody u innych gatunków zwierząt. Olsen i wsp. (36) potwierdzili przydatność połączenia trzyosiowych żyroskopów z trzyosiowymi przyspieszeniomierzami (IMU), które pozwalają dokonywać pomiarów w trzech wymiarach. Czujniki zamocowano na grzbiecie i kończynie zadniej 7 koni w celu identyfikacji kulawizn. Badano również zastosowanie bezwładnościowego, bezprzewodowego systemu inercyjnego IMU do obiektywnej oceny reakcji koni na weterynaryjny test występowania szpata. U 17 dorosłych koni umieszczono akcelerometr na głowie i miednicy oraz żyroskop na prawej przedniej kończynie. Odpowiedź na zgięcie była także niezależnie i subiektywnie oceniana przez fachowców jako negatywna lub pozytywna. Subiektywnie oceniona pozytywna reakcja na zgięcie była związana ze znacznymi zmianami w obiektywnych pomiarach symetrii miednicy. Wyniki potwierdzają możliwość użycia systemu IMU do obiektywnej oceny reakcji podczas prób zginania (31). Moorman i wsp. (33) dokonali walidacji systemu IMU w kontekście oceny norm klinicznych koni w stępie i w kłusie. Stwierdzono, że system pod wieloma względami jest obiecujący, jednak nie może być uważany za jednoznacznie wiarygodny w klinicznej ocenie kulawizn z powodu m.in. ograniczeń dokładności. Jeszcze w tym samym roku oceniono przydatność akcelerometrów do oceny zmiany stabilności postawy, porównując dane z akcelerometrów z wynikami płyt siły u 7 klinicznie zdrowych koni. Przeprowadzono minimum 5 prób dla czterech wariantów postawy, a także po podaniu ksylazyny. Współczynniki korelacji między systemami dla wszystkich zmiennych były niskie do umiarkowanych ($r = 0,18$ do $0,58$). Stwierdzono, że zastosowanie przyspieszeniomierzy powinno zostać dokładniej zbadane pod kątem przydatności w ocenie stabilności postawy u koni z zaburzeniami nerwowo-mięśniowymi (33). Badano także zmiany poziomu ataksji u koni po podaniu niskiej i wysokiej dawki ksylazyny. W celu ustalenia mierzalnych parametrów chodu w klinicznej postaci ataksji zastosowano akcelerometry u 8 koni arabskich badanych na bieżni i przy zastosowaniu płyt siłowych. Podawanie ksylazyny indukowało zależną od dawki ataksję u koni i powodowało znaczące zmiany parametrów chodu, przyspieszenia miednicy i zmiennych stabilizacyjnych, z których niektóre zmieniły się w sposób zależny od dawki. Niektóre ze zmienionych parametrów chodu w tym modelu były prawdopodobnie wynikiem ogólnego spowolnienia cyklu kroku następującego po działaniu uspokajającym leku (35). Zastosowania akcelerometrów w medycynie weterynaryjnej obejmowały ocenę czasu działania środków uspokajających na

podstawie i analizie ruchu obserwacji opadania warg. Sześć koni wprowadzono w stan uspokojenia przez podanie detomidyny i detomidyny z butofarolem. Zwierzęta testowano po podaniu leku co 15 minut aż do upływu 2 godzin. Stwierdzono, że analizatory przyspieszeń mogą stanowić obiektywne narzędzie do monitorowania ruchu uspokojonych koni (17).

Na przestrzeni lat poza badaniami podstaw ruchu i diagnostyki kulawizn zaprezentowano wykorzystanie akcelerometrów i żyroskopów w badaniach naukowych o rozległej tematyce związanej ze sportem jeździeckim, m.in. w powiązaniu z kuciem czy wpływem podłoża na parametry ruchu. Porównano pomiary ruchu koni z niewerkowanymi kopytami, kopytami w podkowach klasycznych oraz z podkładką Equisoft i silikonowym wypełnieniem między kopytem a podkładką (2). Barrey i wsp. (3) stwierdzili, że chociaż podkuwanie może wpłynąć na amplitudę wibracji uderzeniowych na ścianę kopyta, wpływ podkuwania na amplitudę na poziomie stawu śródreżno-paliczkowego jest minimalny. Chateau i wsp. (7) sprawdzali u 3 kłusaków wyścigowych wpływ efektu nawierzchni przed i po przygotowaniu podłoża (wyrównanie, nawilżanie) na parametry biomechaniczne kłusa. Wstępne wyniki wykazały różnice pomiędzy biomechaniką kopyta na różnych nawierzchniach. Zwalnianie i wibracje kopyta przy uderzeniu zostały zmniejszone na powierzchni wyrównanej i nawodnionej, co sugeruje wyższą jakość amortyzującą takiego podłoża. Chateau i wsp. (8) wykorzystali także akcelerometrię w ocenie wpływu podłoża na parametry ruchu, tym razem sprawdzając różnice oddziaływania suchej i wilgotnej nawierzchni piaszczystej oraz powierzchni asfaltowej. Prawe przednie kopyto 4 kłusaków było wyposażone w trójosiowe akcelerometry i podkowę dynamometryczną. Rejestracje przyspieszenia i siły zostały zsynchronizowane z filmem o wysokiej częstotliwości. Stwierdzono, że osuszone powierzchnie piasku zmniejszają wstrząsy i uderzenia siły kopyt. Właściwości tłumienia są związane z krótszą długością i wyższą częstotliwością kroku. Podobne badanie przeprowadzono celem porównania danych dotyczących przyspieszenia kopyt i siły reakcji podłoża u koni wyścigowych pełnej krwi na różnych podłożach. Do pomiarów wykorzystano akcelerometr i podkowę dynamometryczną. Przy syntetycznej powierzchni obserwowano stosunkowo niskie przyspieszenia kopyt, drgania i szczytowe wartości sił reakcji podłoża w stosunku do toru wyścigowego (41). Efekt wpływu podłoża na parametry galopu analizowano także za pomocą technik pomiaru kinematycznego i akcelerometrycznego. Porównywano obciążenia kończyn na nawierzchni trawiastej i piaszczystej, badając w galopie 5 koni. Badanie to potwierdziło właściwości tłumiące podłoża piaszczystych, które pozwalają koniom na bardziej elastyczny i wydajny ruch (10). Stuz i wsp. (41) oceniali różnice między trzema różnymi wzora-

mi ruchowymi kopyta okutego na trzy różne sposoby oraz kopyta nieokutego w kłusie na bieżni i na piasku z dodatkiem geowłókniny. Dziesięć zdrowych koni bez problemów ortopedycznych poddano badaniom trwającym 10 dni. Podkowy spowodowały znaczące zmiany wartości czasoprzestrzennych, co prawdopodobnie było efektem samego ciężaru podków a nie rodzaju kucia, ponieważ nie stwierdzono różnic pomiędzy poszczególnymi parametrami ruchu dla różnych typów kuć. Barstow i wsp. (5) sprawdzali ruch sześciu koni na trawie, piasku i asfalcie, mierząc siłę uderzenia i symetrię ruchu kopyta w stępie i w kłusie. Badanie potwierdziło rosnącą siłę i częstotliwość wibracji kopyta u koni kłusujących wraz ze wzrostem twardości nawierzchni. Kłus w porównaniu ze stępem powodował wzrost siły wibracji, jednak częstotliwość drgań pozostawała bez zmian.

W Japonii (32) z kolei badano dopuszczalną masę obciążenia koni ras rodzimych. Analizowano chód 6 kłaczy w stępie i w kłusie na prostym torze przy obciążeniu od 80 kg do 130 kg. Na podstawie symetrii ruchu wywnioskowano, że dopuszczalna masa nie powinna przekraczać 100 kg, czyli 30% masy koni. Autorzy proponują szersze użycie metody do określania maksymalnych obciążeń koni. W badaniach DuBois i wsp. (11) przetestowano rejestratory danych Onset Pendant G., które zostały umocowane na zadach 2 dorosłych koni w okresie 5 dni. Urządzenie rejestrowało pozycję zwierzęcia co 20 sekund. Nie stwierdzono różnic pomiędzy wynikami uzyskanymi za pomocą akcelerometru a wynikami tradycyjnej analizy filmu, natomiast czułość urządzenia określono na poziomie 99%. Obecna technika pozwala także na zdalne odczytywanie takich danych za pomocą dronów (12). Morrison i wsp. (34) oceniali użyteczność akcelerometrów do pomiarów aktywności fizycznej koni, badając zwierzęta prowadzone w rękę i podczas swobodnego wypasania, i porównując wyniki z analizami filmów. Dane poziomów aktywności 20 koni zmierzone przez analizatory przyspieszenia były zbliżone do poziomów aktywności koni podczas badania „w rękę” mierzonymi tradycyjnymi metodami (video). Na tej podstawie stwierdzono, że akcelerometry są prawidłową metodą kontrolowanego pomiaru aktywności fizycznej u koni. Fries i wsp. (16) wykorzystali czujniki akcelerometryczne w celu oszacowania ilościowej aktywności motorycznej koni. Akcelerometr, który mierzył aktywność i liczbę kroków umieszczono na głowie, kłębie oraz kończynie przedniej i tylnej u 6 koni. Porównano wartości aktywności dla wypasania, stępowania, kłusowania i galopowania. Urządzenie było w stanie oszacować aktywność bez względu na miejsce czujnika, odróżnić chody i prędkości. Najdokładniejsze pomiary uzyskano z czujnika umiejscowionego na kończynie tylnej. Stwierdzono także, że liczenie kroków może być użyteczne dopiero po ręcznym poprawieniu wyników dla stępa (podwojone pomiary w stosunku do

obserwacji). Inne interesujące badanie (30) miało na celu ocenę aktywności koni w zależności od wielkości pastwiska. Przy pomocy akcelerometrów monitorowano 6 koni przez 20 kolejnych dni oceniając czas chodzenia, wypasania i leżenia. Badanie wykazało, że wielkość pastwiska jest powiązana z aktywnością ruchową. Małe padoki w porównaniu ze standardowymi zwiększały czas stania koni i zmniejszały czas przemieszczania. Czas pasienia się był porównywalny na obu przypadkach. Przeprowadzono badanie zachowania koni przy zastosowaniu klocków i łańcuchów zakładanych na przednich nogach na 20 minut w ciągu 5 dni (14). Sprawdzono poziom kortyzolu w osoczu oraz aktywność fizyczną z zastosowaniem analizatorów przyspieszenia. Każdorazowo uzyskano wyniki wskazujące na stres koni o różnym natężeniu. Interesującym zastosowaniem akcelerometrów może okazać się sprawdzane przez Hartmanna i wsp. (21) wykorzystanie czujników do sygnalizowania porodu u klaczy. Czujniki umieszczono na kantarach 8 klaczy w zaawansowanej ciąży i oceniano niepokój występujący przed wyźrebieniem na podstawie aktywności ruchowej.

Dotychczas w niewielkim stopniu wykorzystywano w biomechanice urządzenia typu akcelerometr czy żyroskop do badań dotyczących samych metod treningowych koni, to samo dotyczy układów scalonych IMU czy MEMS (od ang. mikroukład elektromechaniczny). Już w 2007 r. (23) przedstawiono projekt urządzenia śledzącego i monitorującego w czasie rzeczywistym pozycję, prędkość i stany fizjologiczne koni do celów treningu jeździeckiego. W ciągu kilku ostatnich lat pojawiły się urządzenia wdrażające założenia projektu i stopniowo zyskują na popularności wśród amatorów i zawodowców uprawiających jeździectwo, gdzie zastosowano pomiary GPS i model IMU w celu wychwycenia pozycji konia i dynamiki ruchu. Opisano zastosowanie tego typu urządzeń w treningu koni ujeżdżeniowych w celu dopracowania umiejętności jeźdźcy i konia, dzięki ilościowemu pomiarowi parametrów ruchu. Obiecujące wydaje się zastosowanie omówionych technik w badaniach biomechanicznych dotyczących skoku, gdyż w zestawieniu z metodami jakościowymi mogą okazać się niezastąpione (45).

Podsumowując przedstawiony przegląd literatury należy stwierdzić, że zainteresowanie nowymi możliwościami badań i zastosowanie akcelerometrów, a w późniejszym okresie akcelerometrów i żyroskopów znacząco wzrasta. Z początkowej fazy badań głównie określania poprawności chodu i stopnia kulawizn znalazły one szersze zastosowanie w medycynie weterynaryjnej i zootechnice, i to w coraz szerszym zakresie badań jak analizy treningu czy dobrostanu koni. Dane zbierane są w coraz mniej inwazyjny sposób – bezkontaktowo za pomocą sieci internetowych czy za pomocą dronów. Nie bez znaczenia jest w tym rozwoju także ewolucja myśli technicznej – liczba analizatorów jest

coraz większa w coraz mniejszych urządzeniach w formie minimalistycznych układów scalonych. Połączenie coraz większej liczby analizatorów daje coraz szersze możliwości. Dzięki takim możliwościom przechodzą one z etapu zastosowań badawczych do codziennej praktyki jak obecnie stosowane modele jednostek pomiaru inercji (IMU) – typu Equimetrics, Seaver czy EquiMoves.

Piśmiennictwo

1. *Balczak J.*: Rozpoznawanie wzorców ruchowych przy użyciu żyroskopu i akcelerometru. Praca magisterska 2015, 10-13.
2. *Back W., Clayton H. M.*: Equine Locomotion. wyd. Saunders, Elsevier Ltd. 2013.
3. *Barrey E., Galloux P.*: Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. Equine Vet. J. 1997, 23, 45-49.
4. *Barrey E., Hermelin M., Vaudelin J. L., Poirel D., Valette J. P.*: Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. Equine Vet. J. 1994, 26, 7-12.
5. *Barstow A., Bailey J., Campbell J., Harris C., Weller R., Pfau T.*: Does 'hacking' surface type affect equine forelimb foot placement, movement symmetry or hoof impact deceleration during ridden walk and trot exercise? Equine Vet. J. 2019, 51, 108-114.
6. *Burn J. F., Wilson A., Nanson G. P.*: Impact during equine locomotion: techniques for measurement and analysis. Equine Vet. J. 2017, 29, 9-12.
7. *Chateau H., Holden L., Robin D., Falala S., Pourcelot P., Estoup P., Denoix J. M., Crevier Denoix N.*: Biomechanical analysis of hoof landing and stride parameters in harness trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. Equine Vet. J. 2010, 42, 488-495.
8. *Chateau H., Robin D., Simonelli T., Pacquet L., Pourcelot P., Falala S., Denoix J. M., Crevier-Denoix N.*: Design and validation of a dynamometric horseshoe for the measurement of three-dimensional ground reaction force on a moving horse. J. Biomech. 2009, 42, 336-340.
9. *Cottin F., Metayer N., Goachet A. G., Julliard V., Slawinski J., Billat V., Barrey E.*: Oxygen consumption and gait variables of Arabian endurance horses measured during a field exercise test. Equine Vet. J. 2010, 42, 1-5.
10. *Crevier-Denoix N., Pourcelot P., Holden-Douilly L., Camus M., Falala S., Ravary-Plumioën B., Vergaria C., Desquilbet L., Chateau H.*: Discrimination of two equine racing surfaces based on forelimb dynamic and hoof kinematic variables at the canter. Vet. J. 2013, 198, 123-129.
11. *DuBois C., Zakrajsek E., Haley D., Merckies K.*: Validation of triaxial accelerometers to measure the lying behaviour of adult domestic horses. Animal 2015, 9, 110-114.
12. *Díaz-Delgado R., Múcher S.*: Editorial of Special Issue Drones for Biodiversity Conservation and Ecological Monitoring. Drones 2019, 47.
13. *Dzierżęcka M., Kobryń H.*: Kinematics analysis of equine paces. Med. Weter. 2004, 60, 360-363.
14. *Everett J. B., Schumacher J., Doherty T. J., Black R. A., Amelse L. L., Krawczel P., Coetzee J. F., Whitlock B. K.*: Effects of stacked wedge pads and chains applied to the forefeet of Tennessee Walking Horses for a five-day period on behavioral and biochemical indicators of pain, stress, and inflammation. Am. J. Vet. Res. 2018, 79, 21-32.
15. *Fercher Ch.*: The Biomechanics of Movement of Horses Engaged in Jumping Over Different Obstacles in Competition and Training. J. Equine Vet. Sci. 2017, 49, 71-80.
16. *Fries M., Montavon S., Spadavecchia C., Levionnois O. L.*: Evaluation of a wireless activity monitoring system to quantify locomotor activity in horses in experimental settings. Equine Vet. J. 2017, 49, 225-231.
17. *Frigerio M. A., Gómez Cisneros D., Lorente I. S., Manso-Díaz, G., López-Sanromán J.*: A kinematic comparison of the locomotor pattern of horses sedated with detomidine alone and in combination with low doses of butorphanol. Equine Vet. J. 2019, 51, 825-830.
18. *Greco-Otto P., Baggaley M., Edwards W. B.*: Water treadmill exercise reduces equine limb segmental accelerations and increases shock attenuation. BMC Vet. Res. 2019, 15, 329.
19. *Gustås P., Johnston C., Roepstorff L., Drevemo S.*: In vivo transmission of impact shock waves in the distal forelimb of the horse. Equine Vet. J. Suppl. 2001, 33, 5-11.
20. *Gustås P., Johnston C., Roepstorff L., Drevemo S., Lanshammar H.*: Relationships between fore- and hindlimb ground reaction force and hoof deceleration patterns in trotting horses. Equine Vet. J. 2004, 36, 737-742.
21. *Hartmann C., Lidauer L., Aurich J., Aurich C., Nagel C.*: Detection of the time of foaling by accelerometer technique in horses (Equus caballus) – a pilot study. Reprod. Dom. Anim. 2018, 53, 1279-1286.

22. Holden-Douilly L., Pourcelot P., Desquilbet L., Falala S., Crevier-Denoix N., Crevier-Denoix H.: Equine hoof slip distance during trot at training speed: Comparison between kinematic and accelerometric measurement techniques. *Vet. J.* 2013, 197, 198-204.
23. Józwiak P., Jaśkowski B. M., Józwiak A., Kosek W., Knapkiewicz P., Jaśkowski J. M.: Kinematyczna ocena ruchu konia. *Med. Weter.* 2014, 70, 30-35.
24. Keegan K. G., Kramer J., Yonezawa Y., Maki H., Pai F., Dent E. V., Kellerman T. E., Wilson D. A., Reed K. S.: Assessment of repeatability of a wireless, inertial sensor-based lameness evaluation system for horses. *Am. J. Vet. Res.* 2011, 72, 1156-1163.
25. Keegan K. G., Yonezawa Y., Pai P. F., Wilson D. A.: Accelerometer-based system for the detection of lameness in horses. *Biomed. Sci. Instrum.* 2002, 38, 107-112.
26. Keegan K. G., Yonezawa Y., Pai P. F., Wilson D. A., Kramer J.: Evaluation of a sensor-based system of motion analysis for detection and quantification of forelimb and hind limb lameness in horses. *Am. J. Vet. Res.* 2004, 65, 665-670.
27. Kienapfel K., Preuschoft H., Wulf A., Wagner H.: The biomechanical construction of the horse's body and activity patterns of three important muscles of the trunk in the walk, trot and canter. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 2018, 102, 818-827.
28. Lewczuk D.: Basic biomechanical terminology concerning horses. *Med. Weter.* 2004, 60, 1326-1328.
29. Lewczuk D.: Biomechanika skoku konia. *Prace i Mat. Zoot.* 2004, 62, 23-36.
30. Maisonnier I. N., Sutton M. A., Harris P., Menzies Gow N., Weller R., Pfau T.: Accelerometer activity tracking in horses and the effect of pasture management on time budget. *Equine Vet. J.* 2019, 51, 840-845.
31. Marshall J. F., Lund D. G., Voute L. C.: Use of a wireless, inertial sensor-based system to objectively evaluate flexion tests in the horse. *Equine Vet. J.* 2012, 44, 8-11.
32. Matsuura A., Irimajiri M., Matsuzaki K., Iraguri Y., Nakanowatari T., Yamazaki A., Hodate K.: Method for estimating maximum permissible load weight for Japanese native horses using accelerometer based gait analysis. *Anim. Sci. J.* 2013, 84, 75-81.
33. Moorman V. J., Reiser R. F., McIlwraith C. W., Kawcak E. Ch.: Validation of an equine inertial measurement unit system in clinically normal horses during walking and trotting. *Am. J. Vet. Res.* 2012, 73, 1160-1170.
34. Morrison R., Sutton D. G. M., Ramsay C. et al.: Validity and practical utility of accelerometry for the measurement of in-hand physical activity in horses. *BMC Vet. Res.* 2015, 11, 233.
35. Nout Lomas Y., Page K., Kang H., Aanstoos M., Greene H.: Objective assessment of gait in xylazine induced ataxic horses. *Equine Vet. J.* 2017, 49, 334-340.
36. Olsen E., Andersen P. H., Pfau T.: Accuracy and Precision of Equine Gait Event Detection during Walking with Limb and Trunk Mounted Inertial Sensors. *Sensors* 2012, 12, 8145-8156.
37. Parsons K. J., Wilson A. M.: The use of MP3 recorders to log data from equine hoof mounted accelerometers. *Equine Vet. J.* 2006, 38, 675-680.
38. Pratt G. W.: Model for injury to the foreleg of the Thoroughbred racehorse. *Equine Vet. J.* 1997, 29, 30-32.
39. Robert C., Valette J. P., Degueurce C., Denoix J. M.: Correlation between surface electromyography and kinematics of the hindlimb of horses at trot on a treadmill. *Cell Tissues Organs* 1999, 165, 22-113.
40. Scott R., Nankervis K., Stringer C., Westcott K., Marlin D.: The effect of water height on stride frequency, stride length and heart rate during water treadmill exercise. *Equine Vet. J.* 2010, 42, 662-664.
41. Setterbo J. J., Garcia T. C., Campbell I. P., Reese J. L., Morgan J. M., Kim S. Y., Hubbard M., Stover S. M.: Hoof accelerations and ground reaction forces of Thoroughbred racehorses measured on dirt, synthetic, and turf track surfaces. *Am. J. Vet. Res.* 2009, 70, 1220-1229.
42. Starke S. D., Witte H. T., Maya S. A., Pfau T.: Accuracy and precision of hind limb foot contact timings of horses determined using a pelvis-mounted inertial measurement unit. *J. Biomech.* 2012, 45, 1522-1528.
43. Stutzl J. Ch., Vidondo B., Ramseyer I. A., Maninchedda U. E., Cruz A. M.: Effect of three types of horseshoes and unshod feet on selected non-podal forelimb kinematic variables measured by an extremity mounted inertial measurement unit sensor system in sound horses at the trot under conditions of treadmill and soft geotextile surface exercise. *Vet. Rec. Open* 2018, 5, 237.
44. Thompson K., Clarkson L.: How owners determine if the social and behavioral needs of their horses are being met: Findings from an Australian online survey. *Equitation Science: Improved welfare through scientific data* 2019, Aust. *Equine Vet.* 29, 128-133.
45. Thomsen M. H., Persson A. B., Jensen A. T., Sørensen H., Andersen P. H.: Agreement between accelerometric symmetry scores and clinical lameness scores during experimentally induced transient distension of the metacarpophalangeal joint in horses. *Equine Vet. J.* 2010, 42, 510-515.

Adres autora: mgr inż. Katarzyna Becker, Krukówko 38, 89-115 Mroczka;
e-mail: becker.kasia@wp.pl.



Original Research

Variability of Jump Biomechanics Between Horses of Different Age and Experience Using Commercial Inertial Measurement Unit Technology

Katarzyna Becker^a, Dorota Lewczuk^{b,*}^a Bydgoszcz University of Science and Technology (Politechnika Bydgoska), Bydgoszcz, Poland^b Institute of Genetics and Animal Biotechnology PAS Jastrzębiec, Magdalenka, Poland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 February 2022

Received in revised form 30 September 2022

Accepted 19 October 2022

Available online 22 October 2022

Keywords:

Horse

Jumping

IMU

Age

Experience

ABSTRACT

The application of commercial inertial measurement units has become popular in equestrian sports, which may help to eliminate a gap of knowledge concerning many aspects of biomechanics in training. This study employed the Seaver IMU system to measure jumping characteristics of horses with differing age-competition experience during regular training. It was hypothesized that experience level results in lower variability of jumping parameters. Twelve Warmblood horses aged 5 to 6 years with/without competition experience and 7 to 11 years with experience were investigated during regular training in 2 training centers. Consistent number of 10 successive jumps of the individual chosen course of vertical and spread obstacles (5th –15th) were analyzed and the following parameters were measured: jump height, reserve and length; taking off angle, acceleration, velocity; jump spatial shifting, energy by landing, and frequency of approach strides. Preliminary analysis confirmed comparable physiological effort in 2 training center based on heart rate, distance and duration measurements. The multifactorial analysis of variance for biomechanical data included in the statistical model the random effect of horse and fixed effects of training center, age-experience group, successive jump number, obstacle type and height. Four parameters were significantly different between the younger, inexperienced group and experienced younger and older horses: height of jump ($P = .01$), frequency of approach strides ($P = .005$), acceleration of taking off ($P = .01$), and energy by landing ($P = .0013$). Standard errors for almost all the parameters reached higher values for the youngest, inexperienced horses. Variability of jumping parameters was lower for experienced groups of horses, suggesting higher precision on obstacle courses.

© 2022 The Author(s). Published by Elsevier Inc.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

1. Introduction

Training of sport horses should focus on the development and improvement of natural movements and jumping technique [1]. Detailed biomechanical assessment of the jumping ability is becoming more popular in equestrian training practice thanks to new sensor technologies (Seaver, Equisense, Equestic or EquiMoves). The commercial Inertial Measurement Unit (IMU) systems are relatively low in price, easy to use, with traits defined according

to the practical equestrianism. The equine athlete training process can be monitored precisely in the kinematical, dynamical, and spatial aspects (some systems combine physiological data, as heart rate can be also monitored). Inertial navigation is used in measuring accelerations and angular velocities in order to determine horse orientation and position. Thompson et al. [2] underlined the usefulness of new types of monitoring devices for equine training, while Bathe et al. [3] validated girth inertial measurement units. Measurement of training performance parameters can significantly influence the choice of appropriate training method to enhance cooperation between the horse and the rider [4–6]. IMU sensors enable easy collection of large amounts of data with high resolution and high sampling frequency [6]. That is why these innovative methods of jump evaluation may also be used more extensively in horse breeding in a near future [7–10], even nowadays its preliminary usage seem equestrian sport.

In the show jumping sport a systematic monitoring of physiology and biomechanics of exercises administrated to the horse

Conflict of interest statements: The authors declare no conflicts of interest.

Animal welfare/ethical statement: According to the 3rd Ethical Local Commission (Warsaw) the ethical statement is not applicable (European Directive 63/2020 point 3.1 and article 2.1.6 of Polish law). The data was obtained from the study of animal husbandry management. The riders gave the consent for the use of their data and their horses to be used for observations.

* Corresponding author at: Lewczuk Dorota, Institute of Genetics and Animal Biotechnology PAS Jastrzębiec, Postępu 36A, 05-552 Magdalenka, Poland.

E-mail addresses: d.lewczuk@igbzpan.pl, d.lewczuk@ighz.pl (D. Lewczuk).

can have a significant impact on the achievement of training goals. This is especially since the horse jumping technique performed with and without a rider shows that early training does not give long-lasting effects and it was underlined that every horse has its own individual jumping technique recognizable already early in their lives [11,12]. The scale of course difficulty is related to the size, appearance and type of obstacles, route and distances between obstacles. The influence of these all effects on the equine biomechanics should be investigated in detail and taken into account by the sport horse training. The visual structure of an obstacle is widely known as one of the main factors responsible for the level of course difficulty [13] and affecting the jumping technique individually [14]. The number of repetitions can be an important factor in the evaluation of jumping quality [8,9]. The FEI rules regulate the maximum number of jumps to be undertaken, as well as the type, height and duration of the competition (FEI Rules, www.fei.org) in accordance to the horse age and experience. The size of the obstacles should be appropriate to the athlete training status. No studies have been found on the biomechanical analysis of the jumping technique in different aged horse under regular working training. All biomechanical analyses give details on the age and/or experience of studied horses; however, these horse characteristics seem not compared in the usual field practice under the same environmental conditions. Additionally, the use of commercial sensors give the possibility for investigations of new traits describing the jumping technique, as their use in jump tests seems promising [3,14]. Thus, monitoring of horse biomechanics within age classes during routine everyday training with different training protocols seems feasible. Some scientific papers monitoring training based on the training diary are available [15–17], but research on the biomechanical description of routine everyday horse show jumping training is lacking, mainly because of technical limitations. The inertial measurement unit systems provide such a possibility. The aim of the presented study was to investigate how parameters of the jump change depending on the age-experience effect in jumping horses during regular horse work. A research hypothesis was stated that the experience of horses gained during competitions results in a lower variability of biomechanical parameters. Data concerning the effects used in the statistical analysis to reliably assess age-experience differences will also be presented to compare them with findings of other studies. Results obtained using commercial sensors can be useful to support horse practice, giving a preliminary range of values for different aged-experienced horse groups established under comparable environment and riders.

2. Material and methods

2.1. Equipment and parameters

The study was carried out with the use of a commercially available Seaver IMU technology, which facilitates collection of kinematic and dynamic jumping parameters, as well as heart rate monitoring. The Inertial Measurement Unit that was used to collect the data consisted from a 3-axis accelerometer, a gyroscope and a magnetometer with the frequency of 60 Hz. Data collected by the IMU were sent via a Bluetooth to a smartphone and stored on an online server. The device of 14 × 22 cm and 375 g in weight was mounted on the saddle girth, while an additional device electrode (35 g) was placed behind the withers on the left side of the horse, where the saddle comes in contact with the horse. The device determines some parameters based on the calibration (eg. recognition between the horse canter stride and jump based on the device location or calculations of energy expenditure based on the mass [not used in this study]). The basic measurements necessary for the device calibration were taken according to the user's manual:



Fig. 1. The device Seaver girth sleeve on the horse girth. The cable is going to the heart rate electrode under the saddle, placed behind the withers on the left side of the horse, right where the saddle comes in contact with the horse's back (more details in Seaver manual – www.seaverhorse.com).

height at the withers, height of sensor location and shoulder-girth distance, as well as weight of the rider and horse (Figs. 1 and 2).

The following jumping parameters were automatically calculated by the IMU system/software: height of jump (cm), length of jump (cm), angle at taking off (°), frequency of approach strides (strides/min), acceleration of taking off (g), velocity (m/s), spatial shifting (°), and energy by landing (Kj). Only reserve of jump (cm) was calculated separately from the height of jump and the height of obstacle. Definitions of the measured parameters according to the device description are included in Table 1. Additionally, the Seaver device and software gives the possibility of monitoring basic training characteristics - heart rate, total distance covered by training, duration of training, total number of jumps, and training intensity (expressed as heart rate [HR] level in minutes). Two diodes were placed on the horse body, under the girth and below the saddle in the withers area. The heart rate measurement interval was 10 s. Based on HR values the training description was divided into high (>180bpm), medium (110-180bpm) and low (<180bpm) intensity training. Basic characteristics with their definitions and all range values are also included in Table 1. Further information on how the Seaver system processes and analyses IMU data can be found in the Seaver user's guide and patent information. (<https://seaverhorse.com>, pat.US2020/0196901PCT/EP2018/068812). Descriptive statistics and the test of normality were conducted using the Univariate procedure of SAS software (ver.9.4). This training information was analyzed statistically and compared as preliminary basic training characteristics between the riders/centers and horse groups (see below). Biomechanical jumping parameters were investigated on a limited part of training in the obstacle course.

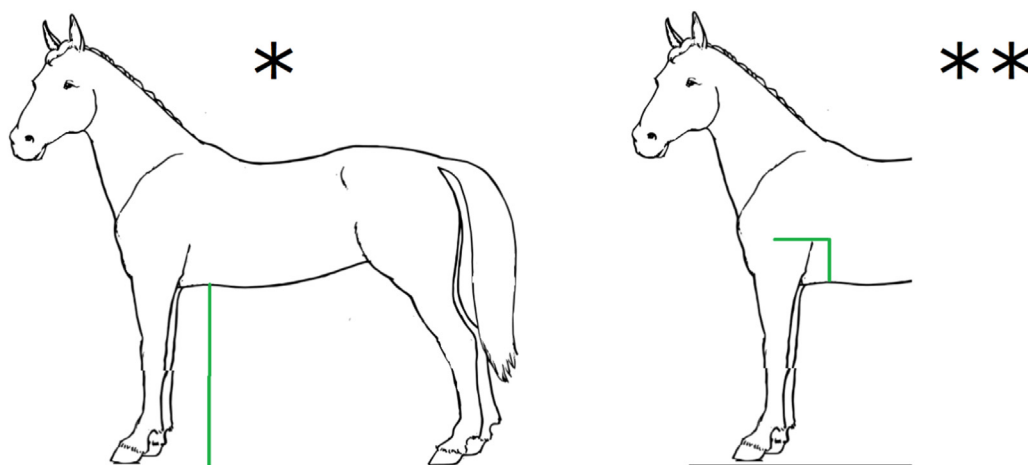


Fig. 2. The measurements for device calibration (height at withers from passports and controlled; More details in Seaver manual – www.seaverhorse.com). * height of sensor location (cm). ** shoulder-girth distance in the broadest point of the shoulder (cm).

Table 1

Description of horse training and jumping parameters (means with standard deviations and range).

Horse Training Parameter	Source/Definition	Mean \pm SD	Range
Height at withers [cm]	Horse passport and measurements	171.50 \pm 4.25	165–179
Age [y]	Horse passport	6.92 \pm 1.98	5–11
Heart rate [bpm - beats per min]	Seaver device – electrode data	151.42 \pm 22.57	107–186
Distance covered by training [km]	Seaver device – distance based on GPS	3.91 \pm 0.43	3.05–4.46
Duration of training [min]	Seaver device – for the whole training	40 \pm 7	29–52
Number of jumps	Seaver device – for all the training	25 \pm 8	14–43
Low intensity training [min]	Seaver device - time of training < 110bpm	12.91 \pm 8.29	3–32
Medium intensity training [min]	Seaver device - time of training between 110–180bpm	10.33 \pm 2.36	7–15
High intensity training [min]	Seaver device - time of training < 180bpm	16.50 \pm 4.70	10–25
Height [cm]	Seaver device - the height of jump above the obstacle	122.52 \pm 12.20	96–172
Reserve [cm]	Calculated from Seaver data - the difference between height of the jump and height of the obstacle	10.06 \pm 7.17	10–39
Length [cm]	Seaver device – the distance between hind limbs when taking off and fore limbs when landing	305.6 \pm 119.4	136–602
Angle at taking off [°]	Seaver device – based on height and length of jump measured as angle from the horizontal ground line	23.27 \pm 4.85	15–36
Frequency of approach strides [strides/min]	Seaver device – stride frequency of five strides before the jump	112.79 \pm 28.15	39–194
Acceleration of taking off [g]	Seaver device – vertical acceleration at take-off	1.36 \pm 0.16	1.12–1.92
Velocity [km/h]	Seaver device – velocity at take off ascending phase	23.19 \pm 0.16	14.10–35.80
Spatial shifting [°]	Seaver device – difference between horse spatial orientations when taking off and when landing	-1.71 \pm 7.72	-45–20
Energy by landing [kJ]	Seaver device - energy absorbed by the horse when landing	2.08 \pm 0.85	0.72–4.85

2.2. Horses and training

Twelve sport Warmbloods (geldings and mares), aged 5 to 11 years (171.5 \pm 4.25 cm height at the withers; 589.8 \pm 19kg weight) and trained regularly in 2 show jumping centers, were investigated during typical everyday training on the obstacle course in the indoor riding area (25 \times 60m), where the jumping track was located under 2 high level riders (each in 1 training center/6 horses of different age per rider). Horses were under constant veterinary monitoring and were healthy (without signs of illness) on the day of training as assessed by their riders and trainers. Each rider in both training centers participating in this study had the 1st sport class certification in the national show jumping classification. Horses were usually ridden by these riders (master rider class, men, 178

and 183cm in height with 79 and 84kg in weight). For the purpose of this study animals were divided into 3 groups based on their age and competition experience: 5- to 6-year-old without any competition experience (low experience group - LE - 3 horses), 5- to 6 year-old with competition experience (medium experience - ME - 4 horses) and above 6 years old with competition experience (high - HE - 5 horses). All the horses considered as having competition experience participated in at least 5 competitions on the national level of L-P classes (100-110cm).

The obstacles jumped by the investigated horses in the 2 different training centers were of the same structure (jump wings with poles), 80 to 140 cm in height and the same width of 90 cm. Investigated obstacles were placed in the course as single obstacles and riders were asked to jump in the middle of the obstacle front, from

the approach perpendicular to the obstacle front. Horse jumped through different types of obstacles (vertical/spread) and through different heights of obstacles (classes of height) in the course chosen randomly by the rider (in order to analyze statistically the type-number-height effects). All details – the characteristics of obstacles in the course (height and type) selected by the rider during monitored training and the successive jump number of each obstacle were noted and taken into account in the statistical analysis. Only a standardized number of 10 jumps of the investigated horse training was analyzed starting from the 6th to the 15th jump (supplement 1). The 1st 5 warming up jumps were excluded for all the groups, whereas young horses took max. 15 jumps. Only successive jumps were taken into account. In the database for jumps from the 1st to the 15th only 4 jumps (2 – 1 for each younger group) were unsuccessful. The number of observations used for the statistical analysis was 116 jumps (Table 2). During the whole training periods (the investigated period and the rest) horses covered a 4 km distance within 40 minutes and jumped 25 obstacles as a mean (Table 1). All data were collected during 1 jumping session.

The study was conducted according to the EU and Polish legal regulations - the ethical protocol was not applicable, because data were collected as a study of animal husbandry management (European Directive 63/2010 and Polish Law – article 2.1.6). Consent was obtained from the riders to use their data and their horses' observations.

2.3. Preliminary training analysis

A preliminary analysis of training was conducted on basic training characteristics received additionally from the Seaver device in order to compare the training conditions from 2 different training centers/riders and to estimate potential differences between training conditions and characterize performed training effort. The analysis of variance with the GLM procedure (SAS software 9.4) was conducted to investigate fixed effects of training center/rider and horse group. The least square means with *P*-values for training description are presented in Table 3. Except for the duration of total training time and medium intensity time (110–180 bpm), there were no other differences in training conducted in the 2 centers. It seems that both riders used comparable training methods (most parameters did not differ between training for the center/riders),

however, the effect of the training center/rider was included in the final analysis for jumping parameters.

2.4. Statistical analysis of jumping data

The statistical analysis of investigated jumping parameters was conducted as the analysis of variance using the Mixed procedure of the SAS program (SAS software 9.4). The statistical analysis for the jumping parameters included the random effect of the horse in the training centers (the nested effect) and fixed effects of the age-experienced group (LE, ME, HE), successive number of jump (6th–15th), type of the obstacle (vertical, spread), height of the obstacle (≤ 100 cm, 101–120cm, >120 cm) and the rider's training center (1–2). The post hoc test for LSMs was used to evaluate differences between individual classes of the effects.

3. Results

The number of jumps in different obstacle types and height classes, as well as between the rider centers was almost equal, except for the number of jumps for the least experienced horses (LE group), which was lower (Table 2). The analysis of variance used for data analyses corrected data for such discrepancy in the numbers of observations. The training methods for the sport horses examined in the preliminary statistical analysis from 2 experienced riders/trainings were comparable (Table 3) and as expected from preliminary analysis, the training center/rider did not influence any of the investigated jumping parameters in the analysis.

Out of the investigated fixed factors for the main statistical analysis of the jump parameters only 3 had a significant impact on the analyzed jump characteristics. The obstacle height had the greatest impact and affected most jumping parameters. In contrast to the obstacle height, the type of obstacle did not influence any of the parameters. The successive number of jump had a significant effect on half of the jumping parameters. Finally, the considered age-experience group had a significant effect on the height of jump ($P = .01$), acceleration of taking off ($P = .01$), frequency of approach strides ($P = .005$), and energy by landing ($P = .0013$). Detailed results are described below and presented in the Tables 4–7.

Table 2

The number of observations in the training groups per obstacle type and height.

Observations in Horse Age-Experience Groups (Number of Observations)	Type of Obstacle		Height of Obstacle			Rider/Training Center	
	vertical	spread	≤ 100	101–120	> 120	1	2
Low experience - LE (3 horses; 28 jumps)	18	10	2	23	3	10	18
Medium experience - ME (4 horses; 38 jumps)	24	14	12	24	2	20	19
High experience - HE (5 horses; 50 jumps)	36	14	15	25	10	30	20
OVERALL (12 horses; 116 jumps)	78	38	29	72	15	60	57

Table 3

Results of training parameters from preliminary additional analysis.

Training Parameter	Horse Age-Experience Group LSM \pm SE				Rider/Training Center LSM \pm SE		
	<i>P</i> -value	Low Experience (LE)	Medium Experience (ME)	High Experience (HE)	<i>P</i> -value	1st center	2nd center
Heart rate [bpm]	.13	130.33 \pm 10.51	160.00 \pm 8.97	157.20 \pm 8.09	.09	159.19 \pm 7.66	136.16 \pm 7.33
Distance covered by training [km]	.32	4.09 \pm 0.23	3.65 \pm 0.20	4.00 \pm 0.18	.13	3.72 \pm 0.17	4.12 \pm 0.17
Duration of training [min]	.43	40.80 \pm 2.56	37.50 \pm 2.18	41.32 \pm 1.97	.002	34.24 \pm 1.86	45.50 \pm 1.79
Number of jumps	.52	25.78 \pm 5.35	21.25 \pm 4.57	28.53 \pm 4.13	.81	24.54 \pm 3.90	25.83 \pm 3.73
Low intensity training [min.]	.14	20 \pm 4	9 \pm 3	11 \pm 3	.07	10 \pm 3	18 \pm 3
Medium intensity training [min]	.65	9 \pm 1	11 \pm 1	11 \pm 1	.01	8 \pm 1	12 \pm 1
High intensity training [min]	.14	12 \pm 3	18 \pm 2	19 \pm 2	.76	16 \pm 2	16 \pm 2

Table 4

The effect of age-experience group on jumping parameters (statistical significance in *P*-values, least square means from the statistical model – LSM with its standard errors – SE; *P*-values given in column are related to the main effect, whereas *P*-value from post hoc analysis are labelled using corresponding letters – see below).

Jump Parameters	<i>P</i> -Value	Age-Experience Group LSM (SE)		
		5–6 y without competition experience	5–6 y with competition experience	above 6 with competition experience
Height of jump [cm]	.01	132.09 (2.60) Ab	122.30 (2.21) A	124.72 (1.93) b
Reserve of jump [cm]	.15	14.49 (2.15)	9.24 (1.83)	10.80 (1.61)
Length of jump [cm]	.24	338.77 (29.47)	277.72 (25.16)	313.72 (22.01)
Angle at taking off [°]	.66	25.06 (1.35)	23.94 (1.15)	23.57 (1.00)
Frequency of approach strides [strides/min]	.005	116.54 (7.38) A	92.31 (6.30) AB	124.04 (5.48) B
Acceleration of taking off [g]	.01	1.46 (0.03) Ab	1.36 (0.02) A	1.39 (0.02) b
Velocity of jump [km/h]	.55	23.68 (1.55)	21.80 (1.32)	23.36 (1.16)
Spatial shifting [°]	.82	-2.47 (2.09)	-3.70 (1.78)	-2.37 (1.54)
Energy by landing [kJ]	.001	2.59 (0.13) AB	2.01 (0.11) A	2.24 (0.09) B

A, a – statistically significant differences between LSM values in rows marked A for $P < .01$ and a for $P < .05$

Table 5

The effect of height of the obstacle on jumping parameters (statistical significance in *P*-values, least square means from the statistical model – LSM with its standard errors – SE; *P*-values given in column are related to the main effect, whereas *P*-value from post hoc analysis are labelled using corresponding letters – see below).

Jump Parameters	<i>P</i> -Value	Height of Obstacle LSM (SE)		
		≤100	101 – 120	<120
Height of jump [cm]	.0001	109.12 (2.06) AB	124.20 (1.42) AC	145.79 (2.62) BC
Reserve of jump [cm]	.057	11.14 (1.60)	9.42 (1.16)	13.97 (1.98)
Length of jump [cm]	.0001	219.16 (22.65) AB	314.47 (16.05) AC	396.58 (28.56) BC
Angle at taking off [°]	.002	21.04 (1.05) aB	23.67 (0.74) aC	27.85 (1.33) BC
Frequency of approach strides [strides/min]	.55	113.04 (6.01)	114.26 (4.09)	105.60 (7.74)
Acceleration of taking off [g]	.001	1.23 (0.02) AB	1.37 (0.01) AC	1.61 (0.03) BC
Velocity at taking off [km/h]	.015	20.39 (1.18) ab	23.53 (0.84) a	24.92 (1.48) b
Spatial shifting [°]	.009	0.49 (1.73) A	-1.27 (1.16) B	-7.76 (2.26) AB
Energy by landing [kJ]	.0001	1.35 (0.11) AB	2.14 (0.07) AC	3.36 (0.14) BC

A, a – statistically significant differences between LSM values in rows marked A for $P < .01$ and a for $P < .05$

3.1. Age - experience horse group

The investigated age-experience effect on jumping parameters is presented in Table 4. The LE group of 5- and 6-year old horses without competition experience differed statistically more significantly in jump height from the ME horses ($P < .01$) than from the HE group ($P < .05$). The ME group had jumps lower by about 8% than the other young horses (LE) and HE received results about 6% lower than LE (Table 4). The experienced horses (HE and ME) did not differ in the height of jump. Similar differences between groups were observed for the acceleration of taking off. Horses with experience (ME, HE) were characterized by lesser acceleration (5%-7%) of taking off than those without experience (LE). The frequency of approach strides was the lowest for ME group and differed statistically significantly (26%–34%) from the other groups. Horses without show experience (LE) differed significantly ($P < .01$) in energy by landing from horses with experience (ME, HE). Experienced horses (HE, ME) landed with lower energy (14%–22%).

3.2. Obstacle height and type effect

The height of the obstacle influenced most of the jumping parameters (Table 5). The height of jumping increased with the height of the obstacle, with the differences of 14% to 17% between the observed obstacles classes. The length of jump increased significantly ($P < .0001$) with the height of obstacle up to 43%. The angle of taking off increased with the height of the obstacle as well ($P = .002$) up to 32%. As expected, acceleration of taking off increased ($P < .001$) with obstacle height with the largest difference of 27% being noted between the lowest and highest obstacle classes. Velocity at taking off increased ($P = .015$) with the height of the obstacle about 22%. A new jumping parameter proposed by Seaver - spatial shifting of the horse body above the obstacle during the jump airborne phase decreased ($P = .009$) with the height of obstacle, so higher jumps were less perpendicular to the obstacle during the airborne phase. The energy during landing increased more markedly (up to 150%) with the height of obstacle

Table 6

The effect of type of the obstacle on jumping parameters (statistical significance in *P*-values, least square means from the statistical model – LSM with its standard errors – SE; *P*-values given in column are related to the main effect, whereas *P*-value from post hoc analysis are labelled using corresponding letters – see below).

Jump Parameters	<i>P</i> -Value	Type of Obstacle LSM (SE)	
		vertical	spread
Height of jump [cm]	.93	126.45 (1.53)	126.30 (1.80)
Reserve of jump [cm]	.93	11.56 (1.23)	11.46 (1.39)
Length of jump [cm]	.6	328.15 (17.14)	291.99 (19.72)
Angle at taking off [°]	.51	23.90 (0.79)	24.48 (0.91)
Frequency of approach strides [strides/min]	.39	108.64 (4.42)	113.29 (5.23)
Acceleration of taking off [g]	.69	1.41 (0.02)	1.40 (0.02)
Velocity [km/h]	.09	23.76 (0.90)	22.13 (1.03)
Spatial shifting [°]	.64	-3.22 (1.26)	-2.48 (1.52)
Energy by landing [kJ]	.38	2.33 (0.08)	2.23 (0.09)

($P = .0001$). The type of obstacle was not statistically significant for any measured parameters; however, it was close to being significant for length of the jump and velocity (Table 6).

3.3. Successive number of the jump

The influence of successive jump number was significant for some parameters related mainly to the size of jump (reserve, height and length), as shown in Table 7. The jump reserve increased ($P = .0003$) up to the 8th jump, then it decreased. Similar direction of changes were observed for the length ($P = .03$) and height of the jump, with the 9th jump being the longest and the 8th jump the highest. The greatest acceleration ($P = .0089$) and energy absorbed (0.02) by landing were also observed as the highest value for the 8th jump. The most statistically significant differences were recorded between the 8th, 9th, 14th and 15th jumps. Jump number 8 turned out to be the highest with the greatest reserve ($P = .0003$). The acceleration of taking off decreased from the 8th jump with each successive jump. The horses absorbed the least amount of energy by landing ($P = .02$) when they jumped the 14th jump (Table 7).

In summary of the results it can be underlined that younger and less experienced horses jumped higher than the others. The taking off angle, acceleration, velocity and approach stride frequency were greater for older and more experienced horses. The standard errors for all the parameters reached higher values for the youngest, inexperienced horses (Table 4). Variability measured in standard errors for jumping parameters was about 35% higher for inexperienced young horses (except for acceleration of taking off – 50% and energy by landing – 44%) than for older, highly experienced horses. The standard errors of jumping parameters for younger, horses with medium experience were by approx. 15% higher in comparison with the highly experienced horse group.

4. Discussion

The lack of differences between the investigated centers/riders in the preliminary analysis confirms comparable training methods and skills of the riders. The horse and training center (rider) effects included in the final statistical model of the study allowed for possible specific bias corrections. Another study using IMUs mounted on the body of riders stated that there are no clear differences between jumps performed under riders of different skill levels [18].

4.1. Age-experience effect

The basic information on sport horse biomechanics was described many years ago [29]; however, a considerable amount of information for the horse practitioner is missing, especially in the case of training and age related effects. Except for the longitudinal study on Dutch horses [19,20], all other research has concentrated on a single study comparison or short training effects [21–23], while most data described young horse development. In the presented research the age-experience grouping included also older, experienced horses and the age-experience effect had a significant effect on many investigated jumping parameters. Even if the recorded results may have been influenced by the diverse numbers of jumps in individual groups of horses, the data were analyzed by the analysis of variance, which introduces adjustments for such an effect. The youngest and the least experienced horses showed fewer jumps at the lowest obstacle heights in the total number of jumps. This also seems to be important training information, as experienced riders with unexperienced horses performed jumping on higher obstacles and eliminate low height jumps. Probably because such a strategy ensures new experience for young horses and eliminated jumps that are too easy for the horses to develop them in an efficient way.

The jumping parameters change with age and experience. It corresponds with training demands, as more difficult competition runs are usually assigned for horses that are older and more skillful in the training process. More experienced horses cope better with requirements of the course, probably in proportion to the years under saddle when they are anatomically and physiologically prepared to take up this type of challenge. The development of muscle structure in jumping training [24] allowed them to deal with higher obstacles from lower acceleration of taking off and velocity, producing lower energy by landing being of extremely importance for tendon health [25]. The jumping experience let them jump in a more economical way – on the same height of obstacles the reserve of the jump is sufficient to minimize jump length. New horse strategies of jumping may also be connected with reducing fear reactions [26].

Obtained age-experience changes in jumping parameters seem positive reactions in the jumping process. During training, the observed jumping parameters are more robust (lower variability), horses are prepared for shortening (and changing) their jump

Table 7

The effect of the successive number of jump on jumping parameters (statistical significance in *P*-values, least square means from the statistical model – LSM with its standard errors – SE; *P*-values given in column are related to the main effect, whereas *P*-value from post hoc analysis are labelled using corresponding letters – see below).

Jump parameters	<i>P</i> -value	Successive Number of Jump LSM (SE)									
		6th	7th	8th	9th	10th	11th	12th	13th	14th	15th
Height of jump [cm]	.02	127.75 (2.66) a	128.68 (2.92)	133.93 (2.74) bcde	127.75 (6.67)	127.42 (2.64)	125.50 (2.66) b	124.42 (2.64) c	122.57 (2.69) d	120.65 (2.66) ae	124.68 (2.79)
Reserve of jump [cm]	.0003	11.42 (1.98) a	14.04 (2.16) bcde	18.27 (2.03) afjJK	13.99 (1.98) lgm	12.77 (1.96) fh	12.30 (1.98) n	8.67 (1.97) bhl	8.72 (2.00) cig	6.84 (1.98) dJn	8.08 (2.07) eKm
Length of jump [cm]	.03	316.67 (28.73)	309.80 (31.45)	357.76 (29.56) abc	370.31 (28.81) deG	333.96 (28.46) j	320.22 (28.74)	320.22 (28.73) aG	276.44 (28.54) bj	262.38 (29.03) e	286.94 (28.73) cd
Angle at taking off [°]	.21	25.11 (1.34)	25.72 (1.15)	24.75 (1.00)	21.54 (1.34)	23.16 (1.33)	23.45 (1.34)	25.06 (1.33)	24.86 (1.36)	22.54 (1.34)	25.62 (1.41)
Frequency of approach strides [strides/min]	.97	108.53 (7.92)	106.61 (8.71)	106.66 (8.16)	109.88 (7.94)	110.74 (7.84)	114.44 (7.91)	106.42 (7.87)	115.98 (8.0)	116.30 (7.92)	114.10 (8.33)
Acceleration of taking off [g]	.0089	1.43 (0.03) a	1.43 (0.03) b	1.49 (0.03) deFG	1.41 (0.03) h	1.42 (0.03) i	1.41 (0.03) j	1.38 (0.03) d	1.36 (0.03) e	1.33 (0.03) abFhij	1.38 (0.03) G
Velocity at taking off [km/h]	.09	22.85 (1.48)	22.92 (1.62)	24.41 (1.52)	26.12 (1.49)	23.98 (1.47)	23.65 (1.48)	21.30 (1.47)	20.80 (1.50)	22.72 (1.48)	20.71 (1.55)
Spatial shifting [°]	.44	-1.82 (2.32)	-5.02 (2.57)	-1.08 (2.40)	-5.19 (2.33)	-1.67 (2.30)	-2.05 (2.33)	-2.75 (2.31)	-2.35 (2.35)	3.39 (2.32)	-6.94 (2.49)
Energy by landing [kJ]	.02	2.49 (0.15) a	2.42 (0.17) b	2.73 (0.16) cd	2.35 (0.16) f	2.37 (0.15) g	2.34 (0.16)	2.14 (0.16) c	2.00 (0.16)	1.93 (0.16) abdfg	2.12 (0.16)

A, a – statistically significant differences between LSM values in rows marked A for $P < .01$ and a for $P < .05$

stride without losing the clearance of the jump (all jumps were clear). It seems possible that the medium experience group of horses being “almost trained” and “almost adult” accept the training in a more individual way. Their results are not always in the middle of the scale for the observed results.

4.2. Obstacle effects – height and type

Most of the studied jump parameters changed with the height of obstacle and it seems natural that the flight parabola (the length of jump and the angle at taking off in our study) must fit the obstacle structure. Our results confirmed earlier studies [27–29]. It has been proven that the flight time over the obstacle increases with its height [30]. Fercher [31] concluded that the hind limb taking off distance and the position of the gravity center indicate a tendency toward a closer and more upright take off in the case of wider obstacles. In the presented study the length of the jump changed with obstacle height. Contrary to the changes described above in the jump parabola, Van den Bogert et al. [32] were convinced that the hooves did not change their position during the take-off on different obstacle heights. Thus, it may be concluded that in the range of the most popular jumping distance horses may use different jumping techniques to clear the jump [33]. Fercher [31] suggested that velocity at taking off should be investigated in detail because of the its influence on the jump. Powers [34] indicated that vertical velocity increased with the height of the obstacle. Our results confirm this statement. Meershoek et al. [35] showed that at higher obstacles the load of the fore limbs increases at landing, which was also observed in our study. Only the frequency of approach strides was independent of obstacle height. Differences in the approach and diverse horse reactions in the approach phase depending on the obstacle visualization were found [36].

The “reflex/reflection” horse jumping trait connected with the perception of the obstacle structure [30,28,37] showed that the type by height interaction was not statistically significant. Guillaume et al. [38] used different obstacle configurations and no effect of the obstacle structure was detected for specific muscular and kinematic responses. This finding is consistent with the presented study, as the type of the obstacle had no effect on the investigated parameters. Obtained outcomes may be connected with the location of our study. All the horses were investigated under their usual working conditions on typically jumped obstacles. Such a situation can lead to more courage and less respect in the jumps for all groups of horses. Similarly, the width of the tested obstacle was not high (90cm), which may have led to such results. A comparable trajectory of the mass center and trunk orientation for different jumps was found by Clayton et al. [39].

4.3. Successive jump effect

The successive number of jump had also a significant effect on some investigated parameters of the jump. Similar effects were obtained using the video image analysis of jumping [33]. The acceleration of taking off and the reserve over the obstacle decreased in the presented study with each successive jump (after the 8th jump), which could have been caused by the greater energy expenditure of horses. The changes seem related to the fatigue that occurs during successive jumps. The “cost of a jump” estimated based on the heart rate monitoring will increase with effort [40]. The uneven effect of consecutive efforts was reported by Linder et al. [23]. Efforts performed day by day showed no obvious trends in jumping kinematics.

The individual effect of horse was used in the current study as the correction in the statistical model for other effects. The horse effect involves also individual anatomy, so also the strength of hind

limbs stated by Fercher [31] as the 2nd most important characteristics influencing take off. The differences in the horse biomechanical parameters may appear in many situations during the whole training process, as it may be influenced by their genetic predisposition [41]. These individual differences, as well as the general rules for training should be studied further to facilitate the development of scientifically confirmed training programs to be commonly available. In the training process horses learn to perform tasks in a more repeatable way, which is seen in the reduction of variability observed in this study, as well as the higher repeatability coefficients of measured jumping parameters observed in younger horses trained longer and evaluated as better [9]. The differences between good jumping horses and well-prepared jumpers should also be investigated further, as higher jumps are also observed in the case of inadequate preparation of horses [20]. Probably investigations on the horse jumping parameters stability/variability under different conditions could solve this problem. Some new insight into the horse biomechanics might also be provided if such an analysis could be conducted for all jumps, both successful and unsuccessful. However, experienced riders during the training period teach their horses to avoid unsuccessful jumps. That was the case in our study, thus the received results characterize a successful jumping technique.

4.4. Practical applications, future work and limitations of the study

Nowadays research on the movement of jumping horses does not include data obtained using commercially available devices. During monitoring of training we can use other, more sophisticated measurement methods [31]; however, there is a need for scientifically confirmed data from popular commercially available solutions tested in many situations according to many training methods [42]. Their accessibility and ease of use let the users know their horse training results much better. From the financial point of view, thanks to detailed training data horses may be trained properly and efficiently, without excessive time and money expenditure. Horses can be compared against their own sensor data in the day-by-day results and in comparison of performance achievements. Such monitoring enables also continuous control of welfare and physiological issues.

Most scientists tested horse jumping biomechanics under experimental conditions with several trials on the same obstacle. The usually used equipment (e.g. the gold standard of video image analysis, force plates) can be used under laboratory conditions or in a restricted area of the system calibration, while others (systems with many sensors, horse boots) can influence the naturality of movement. Presented research results are focused on data collected under the natural horse working conditions. The limitation of the study is connected with the low number of horses. It is difficult to find many high class riders and different aged horses trained under comparable conditions. Further research should solve that problem. The unknown distance between obstacles is a part of the jumping task that was to cover obstacles in the horse's natural tempo according to the training stage. The other limitation is connected with the unknown error of the Seaver measurements. However, the information concerning the observed factors is given in % of changes, thus seem informative and comparable. The device should produce the same error with every use, so the data received for the same equipment will be fully comparable. All the groups and horses were measured by the same device and the possible bias is the same for all the horses. Feasibility of the Seaver system seems good as received results are comparable with other presented research results for different investigated effects as presented above.

Nowadays at least 3 different IMU systems differing in complexity are available (Seaver, Equisense, Equestic or the more sophisti-

cated EquiMoves). Commercial inertial sensor units are becoming increasingly popular, therefore providing scientific data and standards seems advisable. Obtained results could serve as the 1st data for the rider's guide that would allow for a comparison between guideline values and the rider's results. It will help in controlling the direction of changes observed in customer training, and compare the observed range of values with limits obtained for different jump heights, types, or the successive number of jumps presented in this study. Observations of the variability in jumping parameters could help the riders check if their horses fit within specific age-experience jumping data. The direction of changes in the jumping parameters with obstacle height/type/structure can verify provided customer training. Information on the differences between successive jumps could help to organize training, as usually, every training should finish with the horse's positive achievement. The data from the analysis of the successive number of jumps informed the riders about the most successful values for each jumping parameter on each successive number of the jump. Therefore, received results suggest that it is wise to train the reserve of the jump and the acceleration of taking off up to the 11th jump, as the 1st ten successive jumps guarantee higher, that is most desirable values. That is not so important in the case of training dedicated to strength enlargement, as the size of the jump (length and height) or velocity are less dependent on the successive jump number. Such detailed information connected with the efforts expected for different types and heights of obstacles will allow to construct individual courses in a better way, more beneficial for the horse and owners, as well as improve horse welfare.

5. Conclusions

Jumping parameter data showed that younger and less experienced horses jumped higher than the others. The angle at taking off, acceleration of taking off, velocity and frequency of approach stride were greater for older and more experienced horses. The standard error for almost all the parameters reached higher values for the youngest, inexperienced horses. The recorded values for almost all the jumping parameters in the group of young, inexperienced horses has led to the conclusion that horses, which are talented (investigated horses were selected for sport by experienced riders), healthy (veterinary checked, no inappropriate physiological reactions) and equally trained (most values being the same for both training centers) use their maximum potential to jump. During the process of training they start to properly recognize the obstacle and lower their flight parabola to reduce the cost of the movement; however, it is in the way sufficient to clear the jump. The training process makes it possible to limit the occurrence of result randomness, because almost all the standard errors are lower for older and more experienced horses. The obstacle characteristics results are comparable with earlier research. The IMU sensors seem reasonable for monitoring of the routine everyday equine athlete training. The obtained results are important, as practitioners need data to compare their horse's results.

Author Contribution

Idea - BK, DL, review of literature - BK, data collection - BK, data analysis - BK, DL, writing original draft - BK, DL; critical review of the manuscript - DL

Acknowledgments

The author would like to thank Anna Binczarowska for language corrections.

Financial disclosure

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not for-profit sectors.

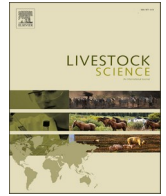
Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at doi:[10.1016/j.jevs.2022.104146](https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104146).

References

- [1] Bachurina EMPolkovnikova. Motor jumping qualities of sports horses and their performance. *Perm Agrarian J* 2020;29:108–14.
- [2] Bathe B, Dawes H, Nankervis K, Esser P, Collett J. Accuracy of girth based measurements of stride characteristics in horses trotting on a treadmill. *Equine Vet J* 2014;46:36.
- [3] Thompson CJ, Luck LM, Keshwani J, Pitla SK, Karr LK. Location on the body of a wearable accelerometer affects accuracy of data for identifying equine gaits. *J Equine Vet Sci* 2018;63:1–7.
- [4] Bosch S, Serra Bragança F, Marin-Perianu M, Marin-Perianu R, Van der Zwaag BJ, Voskamp J, Back W, Van Weeren R, Havinga P. EquiMoves: a wireless networked inertial measurement system for objective examination of horse gait. *Sensors* 2018;18:850.
- [5] Egan S, Brama PA, McGrath D. End-user practices in equine movement analysis: The potential of objective analysis tools to meet their needs proceedings of the institution of mechanical engineers. *J Sports Engin Techn* 2020;234:136–45.
- [6] Serra Bragança FM, Broomé S, Rhodin M, Björnsdóttir S, Gunnarsson V, Voskamp JP, Persson-Sjodin E, Back W, Lindgren G, Novoa-Bravo M, Gmel AI, Roepstorff C, van der Zwaag BJ, Van Weeren PR, Hernlund E. Improving gait classification in horses by using inertial measurement unit (IMU) generated data and machine learning. *Sci Rep* 2020;10:1–9.
- [7] Ricard A, Dumont Saint Priest B, Danvy S, Barrey E. Accelerometers provide early genetic selection criteria for jumping horses. *Front Genet* 2020;11:448.
- [8] Lewczuk D, Sloniewski K, Reklewski Z. Repeatability of the horse's jumping parameters with and without the rider. *Livest Sci* 2006;99:125–30.
- [9] Lewczuk D, Ducro B. Repeatability of free jumping parameters on tests of different duration. *Livest Sci* 2012;146:22–8.
- [10] Lewczuk D, Metera-Zarzycka E. Horse phenotyping based on video image analysis of jumping performance for conservation breeding. *PeerJ* 2019;7:e7450.
- [11] Santamaría S, Bobbert MF, Back W, Barneveld A, van Weeren PR. Variation in free jumping technique within and among horses with little experience in show jumping. *Amer J Vet Res* 2004;65:938–44.
- [12] Santamaría S, Bobbert MF, Back W, Barneveld A, van Weeren PR. Evaluation of consistency of jumping technique in horses between the ages of 6 months and 4 years. *Amer J Vet Res* 2004;65:945–50.
- [13] Lewczuk D. The effect of training on linear jumping parameters in young stallions. *Equine Comp Exer Phys* 2007;4(3-4):159–65.
- [14] Lewczuk D, Wejer J, Sobieraj D. Analysis of angles of taking off landing and work of limbs in horses jumping above the spread obstacle of different structure. *Animal Sci Paper and Rep* 2007;25:297–304.
- [15] Lönnell C, Roepstorff L, Hernlund E, Schön C, Egenvall A. Training strategies and days lost to injury vary in Swedish showjumping yards. In: Performance diagnosis and purchase examination of elite sport horses. *CESMAS Book*; 2010. p. 59.
- [16] Lönnell AC, Bröjer J, Nostell K, Hernlund E, Roepstorff L, Tranquille CA, Murray RC, Oomen R, Weeren van R, Bitschnau s, Montavon s, Weishaupt MA, Egenvall A. Variation in training regimens in professional showjumping yards. *Equine Vet J* 2014;46:233–8.
- [17] Egenvall A, Tranquille CA, Lönnell AC, Bitschnau C, Oomen A, Hernlund E, Montavon S, Franko MA, Murray RC, Weishaupt MA, Weeren van R, Roepstorff L. Days-lost to training and competition in relation to workload in 263 elite show-jumping horses in four European countries. *Prev Vet Med* 2013;112:387–400.
- [18] Patterson M, Doyle J, Cahill E, Caulfield B, McCarthy Persson U. Quantifying show jumping horse rider expertise using IMUs. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology; 2010. p. 684–7.
- [19] Bobbert MF, Santamaría S. Contribution of the forelimbs and hindlimbs of the horse to mechanical energy changes in jumping. *J Exper Biol* 2005;208:249–60.
- [20] Santamaría S, Bobbert MF, Back W, Barneveld A, van Weeren PR. Can early training of show jumpers bias outcome of selection events? *Livest Sci* 2006;102:163–70.
- [21] Becker K, Lewczuk D. Wykorzystanie akcelerometri i żyroskopu w badaniach biomechanicznych koni. *Med Wet* 2020;76:694–9.
- [22] Wejer J, Lendo I, Lewczuk D. The effect of training on the jumping parameters of inexperienced Warmblood horses in free jumping. *J Equine Vet Sci* 2013;33(6):483–6.
- [23] Linder A, Signorini R, de Oliveira K, Bollatti N, Nunez JL. Effect of consecutive jumping efforts over several days on kinetic locomotion parameters in unriden horses – a preliminary study. *Comp Exer Phys* 2020;17:219–28.

- [24] Rietbroek NJ, Dingboom EG, Joosten BJ, Eizema K, Everts ME. Effect of show jumping training on the development of locomotory muscle in young horses. *American J Vet Res* 2007;68(11):1232–8.
- [25] Murray RC, Dyson SJ, Tranquille C, Adams V. Association of type of sport and performance level with anatomical site of orthopaedic injury diagnosis. *Equine Vet J* 2006;38(S36):411–16.
- [26] Borstel von U, Duncan IJ, Lundin MC, Keeling LJ. Fear reactions in trained and untrained horses from dressage and show-jumping breeding lines. *App Anim Behav Sci* 2010;125(3–4):124–31.
- [27] Barrey E, Galloux P. Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. *Equine Vet J* 1997;29(3):45–9.
- [28] Lütteken K. Vergleichende videogestützte 2D-Bewegungsanalyse von Reiter-Pferd-Kombinationen der Weltelite im Springreiten PhD thesis, Deutsche Sport Hochschule, Köln; 2001.
- [29] Falaturi PH, Reininger EF, Preuschoft H. Bewegungsanalyse bei Springpferden mit Hilfe der Computerkinematographie. *Pferdeheilkunde* 2001;17:361–8.
- [30] Clayton HM, Barlow DA. The effect of fence height and width on the limb placements of show jumping horses. *J Equine Vet Sci* 1989;9:179–85.
- [31] Fercher Ch. The biomechanics of movement of horses engaged in jumping over different obstacles in competition and training. *J of Equine Vet Sci* 2017;49:69–80.
- [32] Van den Bogert AJ, Jansen MO, Deuel NR. Kinematics of the hind limb push-off in elite show jumping horses. *Equine Vet J* 1994;26(17):80–6.
- [33] Lewczuk D. Young horse response on changing distance in free jumping combination. *Animal* 2008;2:1651–7.
- [34] Powers PNR. The take off kinematics of jumping horses in a puissance competition. *ISBS Publications Archives* 2002:152–5.
- [35] Meershoek LS, Schamhardt HC, Roepstorff L, Johnston C. Forelimb tendon loading during jump landings and the influence of fence height. *Equine Veterinary Journal* 2001;33:6–10.
- [36] Stachurska A, Pieta M, Nesteruk E. Which obstacles are most problematic for jumping horses? *Applied Ani Behav Sci* 2002;77:197–207.
- [37] Leach DH, Ormrod K, Clayton HM. Stride characteristics of horses competing in Grand Prix jumping. *Amer J Vet Res* 1984;45:888–92.
- [38] Guillaume JF, Laroche D, Babault N. Kinematics and electromyographic activity of horse riders during various cross-country jumps in equestrian. *Sports Biomech* 2021;20(6):680–92. doi:10.1080/14763141.2019.159715.
- [39] Clayton HM, George LS, Sinclair J, Hobbs SJ. Characteristics of the flight arc in horses jumping three different types of fences in olympic competition. *J Equine Vet Sci* 2021;104:103698.
- [40] Schroter RC, Baylis E, Marlin DJ. Gait estimated net cost of transport and heat production at different speeds in three-day-event horses. *Equine Vet J* 1996;28:16–23.
- [41] Cassiat G, Pourcelot P, Tavernier L, Geiger D, Denoix JM, Degueurce D. Influence of individual competition level on back kinematics of horses jumping a vertical fence. *Equine Vet J* 2004;36:748–53.
- [42] Mouloudi S, Rahmanpanah H, Gohari S, Burvill C, Tse KM, Davies HM. What can artificial intelligence and machine learning tell us? A review of applications to equine biomechanical research. *J Mech Behav Biomed Mater* 2021;123:104728.



Phenotypic correlations between jump and gaits characteristics measured by inertial measurement units in horse jumping training - preliminary results

Katarzyna Becker^a, Dorota Lewczuk^{b,*}

^a University of Technology in Bydgoszcz (Politechnika Bydgoska), str. Mazowiecka 28, 85-084 Bydgoszcz, Poland

^b Institute of Genetics and Animal Biotechnology PAS Jastrzębiec, Postępu 36A, 05-552 Magdalenka, Poland

HIGHLIGHTS

- Correlations within gaits parameters are lower than correlations within jumping ones.
- Canter frequency is the only canter parameter moderately correlated with jumping.
- Walk characteristics are low connected with jumping parameters.
- Regularity and frequency correlation is higher in symmetrical than asymmetrical gaits.
- Trot symmetry correlates positively with frequency and negatively with elevation.

ARTICLE INFO

Keywords:

Horse
IMU
Biomechanics
Jumping
Movement
Training

ABSTRACT

High correlations between gaits and jump characteristics are expected because even specialized jumpers need quality of movement to fulfil temporal performance requirements. Twelve sport horses (5-11 years) of different training levels were examined during regular training under high-level riders in two training centers. They covered a 3-4 km distance overcoming up to 30 obstacles. The first 15 jumps were analyzed. They jumped randomly chosen obstacles of the known characteristics from the basic, perpendicular approach. Jumping and movements parameters (179 observations) were measured using Seaver® devices based on inertial measurement unit technique. The following jump data were analyzed: height, length, reserve, frequency of approach, angle at take-off, acceleration of take-off, velocity, spatial shifting and energy by landing. The device measured 10 movement parameters. Frequency, elevation and regularity of walk, trot and canter, as well as trot symmetry were available. Relationships between parameters were analyzed using Pearson/Spearman correlations (SAS, CORR) and partial correlations corrected for fixed effects of obstacle type and height, successive jump number, training center/rider and horse age-experience (SAS, GLM). Pearson and Spearman correlations within jumping parameters (-0.48 – 0.95) and within gaits parameters (-0.64 – 0.78) were significant at least for $p < 0.05$. Obtained partial correlations between gaits and jumping (above 0.3) showed that some gait characteristics are connected with jump quality. However, most partial correlations were low. Moderate values were noted for jump and canter frequencies (0.44), which is treated in horse selection as a jump determinant and walk regularity and three jumping parameters (0.33-36).

1. Introduction

New forms of sport horse training are being developed constantly and result in new demands related to requirements of equestrian sports. Inertial measurement units (IMU) seem to be an important tool to fulfil

these urgent needs in monitoring of training, thus broadening the knowledge on motion parameters. The monitoring of training allow to control progress in jumping and movement parameters by observation of changes, including direction of their changes. The IMU measurements of horse movement kinematics and dynamics are increasingly commonly

* Corresponding author.

E-mail address: d.lewczuk@igbzpan.pl (D. Lewczuk).

<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105112>

Received 12 April 2022; Received in revised form 26 October 2022; Accepted 27 October 2022

Available online 30 October 2022

1871-1413/© 2022 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

accepted among both amateurs and equestrian professionals (Becker and Lewczuk, 2020; Gmel et al., 2020). Horses are animals with considerable athletic abilities and an extensive gait repertoire in spite of their large size and body mass (Clayton, 2016). Recognition of these skills is of special importance during different stages of specific, individual training in equestrian sports used after general background training. The success in equestrian sport requires mutual coordination in movements and proper dynamic in show jumping competitions (Gregic et al., 2016). Technological progress provides new opportunities in horse evaluation. It is expected to identify movement parameters connected with "good jump" characteristics, facilitating prediction of quality in jump horses. Leguillette et al. (2020) stated that each horse requires individual methods, especially in terms of the workload between jumps and flat work, which is currently unknown, but which needs to be balanced. In jumping competitions, the predisposition to discipline seems defined by the quality of canter, which can be a good forecast of success in sport, as an indicator of imbalance is correlated negatively on the genetic level with horse performance (0.2) (Becker et al., 2013). Janczarek et al. (2013) found during assessing jumping horses' ability at an approach, the position of the poll, as well as the angle of neck position are particularly important. If the horse jumps optimally and has good timing, the tip of the parabola is directly above the obstacle (Topolinski, 2013). Based on current scientific research, a large pool of possible performance-relevant parameters can be selected (Fercher, 2017). The horse jump can be divided into five phases — approach, take-off, suspension, landing and departure. Each of these parts has specific determining factors, which show either a mechanical or a mathematical relationship with jumping quality (Powers and Harrison, 1999). Finally, an adequately trained and specialist bred horse is the one promising good results in equestrian sports (Gregic et al., 2021).

Dependencies of subjectively assessed jumping and dressage traits were investigated both at phenotypic (Molina et al. 1999; Olsson et al., 2000) and genetic levels (Ricard et al., 2000; Hellsten et al., 2006, 2009; Ruhlmann et al., 2009). However, phenotypic results are less available (Rustin et al., 2009) and less objective (Lewczuk, 2013). It seems that their importance is underestimated, although they may be very useful for horse users. They support understanding of training methods. Connections between dressage and jumping traits in different training methods and training progress could help to identify proper training methods. That is of special importance, as genetic correlations between dressage and show jumping traits are reported mostly as negative (Rovere et al., 2017) and it is not necessarily adequate for phenotypic observations, as phenotypic correlations present the connections between traits within a specific environment. At an advanced competition level horses need to cover all obstacles without penalty points in the possible shortest time (Gego, 2006; FEI Jumping Rules 26th edition chapter VI, art.235-239). This requires not only jumping potential, but also rideability and good gaits, at least canter. Such research on the phenotypic background, is not only rare, but also based only on subjective judge scoring or linear profiling. There is a lack of such correlations in biomechanics of sport horses, although considerable knowledge is available (Clayton and Hoobs, 2017; Fercher, 2017). Research provided on jumping biomechanics does not cover relationships with movement characteristics (Santamaria et al., 2004, 2005; Lewczuk, 2006, 2007; Lewczuk and Durco, 2012; Janczarek et al., 2012; de Godoi et al., 2014); however, first studies have been published on genetic parameters of the biomechanics parameters using acceleometry (Dugué et al., 2021; Ricard et al. 2021). Phenotypic correlations provide information on relationships between various traits and allow to choose for training the horse with adequate skills and training methods. On the basis of one trait, we can predict the potential of a horse on another trait. Phenotypic correlations inform on the occurrence and strength of the relationship between observed performance traits, thus they can support faster decisions concerning the specialization of a horse for equestrian sports (dressage or show jumping). In contrast to genetic correlation they do not inform on genes connections, but about skills connections –

genetic skills trained in a specific environment.

The aim of this study was to estimate relationships between jumping and movement traits of adult sport horses based on usual jumping training data coming from IMU measurements. Partial correlations between movement and jumping parameters corrected for significant factors from the statistical model were evaluated. Obtained partial correlation were corrected for the training/rider, horse age-experience group, obstacle size and type, as well as successive number of the jump. Partial correlations were used earlier in analysis of the horse behavioural traits (Ingólfssdóttir and Sigurjónsdóttir, 2008; Wolframm and Meulenbroek, 2012; Rothmann et al., 2014; Shima and Suzuki, 2020) or physiological traits (Koizumi et al., 1989; Bartolomé et al., 2013), and allowed to control significant effects by measuring the relationship. Additionally simple Pearson and Spearman correlations between parameters within jumping traits and within movement traits were presented. High correlations between some gaits and jump quality were expected, because even highly specialized jumpers need high quality movement to fulfil temporal performance requirements. It is expected to verify the hypothesis that jumper horses require high quality gallop and the used IMU technologies enable such research.

2. Materials and methods

Jumping and movement parameters were collected (179 observations) of 12 Warmblood sport horses (5 to 11 years old geldings and mares) with different experience: 5-6-year old without any competition experience (3 horses), 5-6 year old with competition experience (4 horses) and above 6 years old with competition experience (5 horses). Competition experience was defined as at least 5 competitions on the national level of L-P classes with the obstacle height of 100-110cm. Investigated parameters were measured using Seaver® devices (US pat. 2020/0196901 98 PCT/EP2018/068812) based on the inertial measurement unit technique (60Hz) with a build-in the heart rate monitor (10s interval). Data collected by the IMU were sent via a Bluetooth to a smartphone and stored on an online server. Movement parameters were obtained using device algorithms after calibration to the horse's and rider's body mass. All horses were measured on a flat ground at girth height (the distance between the ground and the device location at the lowest position of girth) and half-shoulder-girth length (the distance between the middle of the shoulder in the widest part and girth position) by the investigator (experienced horse rider) according to the User manual (www.seaverhorse.com). The Seaver tape for body measurements was used. Riders were two men, 178 and 183cm in height with 79 and 84kg in weight, respectively. Horses were 171.5 ± 4.25 cm high at the withers and weighed 589.8 ± 19 kg. A girth device with sensors sized 14×22 cm and weighing 375g was mounted on the saddle girth, while an additional electrode (35g) for the heart rate measurement (HR) was placed behind the withers on the left flank of the horse, where the saddle comes in contact with the horse. The device monitored training parameters that describe the horse and the ride, condition, gaits and jumping. Horses were monitored during regular training in two training centers under riders having first sport class certification in the national show jumping classification (each rider mounted 6 horses) and covered an approx. 3-4km distance, overcoming up to 43 obstacles, of 80 - 140 cm in height and 90 cm in width. The obstacles were spread and vertical, build with poles as single obstacles. The riders were asked to jump in the middle of the obstacle front, from the approach perpendicular to the obstacle front. The total time of training was 40 minutes (sd=7) with the mean velocity of 16.08 km/h (sd=3.28). The heart rate during training reached values of 107-186 bpm (beats per minute). Horses spent 16.69 minutes (sd=4.25) in walk, 18.34 (sd=1.45) in trot and 2.15 (sd=1.75) in canter. In total, horses were trained 52% in the straight direction, 25% in the left and 23% the right direction. These working directions were almost identical for trot and walk, except for canter, where the straight direction accounted for 45%, left 30% and right 25% of the time spent in this gait. Riders selected obstacles at

random. Both types of obstacles (vertical and spread) as well as different obstacle heights (<100, 100-120, >120) were jumped by the participating horses. The details of the course covered by every horse and rider were noted as potential factors that can affect jumping parameters and they were used for data correction in the statistical model by calculations.

The preliminary results (SAS analysis, analysis of variance with the rider/training and horse age effects) found no statistically significant differences between horses in terms of most training characteristics (heart rate, distance covered, number of jumps, low (<110 bpm) and high (>180 bpm) intensity training except for the total duration of training and time of medium intensity training (110-180 bpm).

3. Analyzed parameters

3.1. Jumping parameters

For the jump the following parameters were analyzed: height [cm] - height of jump above the obstacle at the device location; length [cm] - distance between hind limbs when taking off and fore limbs when landing; reserve [cm] - difference between height of jump and height of the obstacle; frequency of approach strides [strides/min] - stride frequency of five strides before the jump; angle at take-off [°], acceleration of take-off [g] and velocity at take-off [km/h], horse body spatial shifting [°] - difference between horse body spatial orientations when taking off and when landing; energy by landing [kJ] - energy absorbed by the horse when landing (Table 1). The jump data were monitored for every jump.

3.2. Gait parameters

For the movement characteristics the following parameters were measured (Table 2): stride frequency of walk, trot and canter [strides/min] - number of strides in time; elevation at walk, trot and canter [cm] - vertical displacement of the horse's body; regularity of movement at walk, trot and canter [%] - similarity of frequency at each gait; symmetry of trot [without the unit] - left to right average stride frequency ratio. Data were collected as the mean for performed movements and gaits, as presented in Table 2.

4. Statistical analysis

The correlation analysis was conducted using Pearson's correlation between jumping and gait characteristics, except for two parameters called the reserve and spatial shifting traits, where Spearman's rank correlations were used because of their distribution characteristics. The relationships between jumping and gait parameters were analyzed across the cohort (all jumps) using partial correlations (SAS v.9.4, GLM with the Manova option) with the statistical model including fixed effects of obstacle type (vertical, spread), obstacle height (<100, 100-120, >120), successive jump number (1-15), training center (1,2) and the age-experience effect (1-3). The correlations were presented according to the Quinnipiac University scale (Akoglu, 2018), so the correlations below 0.3 were treated as weak or negligible, and those above 0.3 as moderate. The variables in the partial analysis met test assumptions as partial correlations can be calculated for continuous and categorical data (Lin et al., 2010).

5. Results

Most of the jumping parameters were characterized by moderate variability. The reserve of the jump, which depends on obstacle height, showed greater variability. The spatial shifting from the definition being left-right is an extremely variable parameter; however, it seems connected with the obstacle characteristic. Variability of all the gait parameters was small, except for the elevation of walk being the greatest

Table 1

The description of measured jumping parameters.

Training parameter	Source/ description	mean	sd	Range
JUMPING	Height of jump [cm]	122.52	12.20	96-172
	Reserve of jump [cm]	10.06	7.17	10-39
	Length of jump [cm]	305.6	119.4	136-602
	Angle at take-off [°]	23.27	4.85	15-36
	Frequency of take-off [strides/min]	112.79	28.15	39-194
	Acceleration at take-off [g]	1.36	0.16	1.12-1.92
	Velocity [km/h]	23.19	5.30	14.1-35.8
	Spatial shifting [°]	-1.71	7.72	-45-20
	Energy at landing [kJ]	2.08	0.85	0.72-4.85
	Symmetry at take-off [-]	1.07	0.27	0.64-3.0

one. The correlations were corrected ($p < 0.05$) for age-experience effect in 15 out of 20 investigated parameters, for obstacle type in 10/20 and for obstacle type in 2/20, for the successive jump number in 3/20.

5.1. Correlations between jumping parameters

Data are presented in Table 3. The relationships between jumping parameters are in the wide range of values (-0.91-0.98). Some of them seem predictable, such as connections between energy and acceleration (0.98; $p = 0.0001$), while some are less obvious e.g. energy at landing and velocity at approach (0.57; $p = 0.0001$).

In the case of parameters that characterise size of the jump, the height of jump is strongly correlated with its length (0.67; $p = 0.0001$). The reserve of jump is much more connected with jump height (0.51; $p = 0.0001$) than length (0.31; $p = 0.0002$). It seems natural that angle at take-off is strongly positively correlated with jump height (0.52; $p = 0.0001$) and shows a low negative correlation with jump length (-0.19; $p = 0.04$). The acceleration of take-off and landing energy are very strongly correlated with jump height (both 0.95; $p = 0.0001$) and length (0.73-0.80; $p = 0.0001$). Such correlations are not so strong between velocity and jump height (0.43; $p = 0.0001$), being almost two times weaker than with the length of jump (0.95; $p = 0.0001$).

Symmetry of take-off shows a weak correlation with jump height

Table 2
The description of measured movement parameters.

Training parameter	Source/description	mean	sd	Range	
GAITS	Frequency of walk [strides/sec]	Seaver device – mean number of strides per minute in walk during training	45.80	4.68	36-52
	Frequency of trot [strides/min]	Seaver device – mean number of strides per minute in trot during training	75.18	4.53	66-79
	Frequency of canter [strides/min]	Seaver device – mean number of strides per minute in canter during training	108.43	10.04	87-127
	Regularity of walk [%]	Seaver device – mean stability of frequency of walk during training	84.38	3.47	77-90
	Regularity of trot [%]	Seaver device – mean stability of frequency of walk during training	73.49	9.53	49-87
	Regularity of canter [%]	Seaver device – mean stability of frequency of walk during training	56.01	10.10	40-81
	Elevation at walk [cm]	Seaver device – mean horse vertical displacement in walk during training	2.24	0.84	1-4
	Elevation at trot [cm]	Seaver device – mean horse vertical displacement in trot during training	6.95	1.24	4-8
	Elevation at canter [cm]	Seaver device – mean horse vertical displacement in canter during training	15.33	1.04	14-18
	Symmetry of trot [-]	Seaver device – the ratio of right to left limb acceleration at trot	1.01	0.06	0.91-1.11

(0.21; $p=0.01$) and take-off angle (0.28; $p=0.007$); however, it is almost the opposite in the case of spatial shifting (-0.91; $p=0.0001$). The only jumping parameter not connected with any other description of jump is the frequency of strides at take-off.

5.2. Correlations between movement parameters

Data are presented in Table 4. The correlations between movement parameters are less spectacular than for jumping. The range of correlations is between -0.64 and 0.78. The greatest correlations were found between frequencies and regularities for symmetrical gaits (walk and trot) (0.7-0.78; $p=0.0001$). Such a correlation between canter regularity and canter frequency was much lower and reached 0.27 ($p=0.004$). It is worth noting that for the frequency of walk and canter regularity was strong and negative (-0.64; $p=0.0001$). The other relationships between

Table 3
Pearson/Spearman's* correlations between jumping parameters and their significance (in bold for $*P<0.05$).

Jump parameters	Height	*Reserve	Length	Angle at take-off	Frequency of take-off	Acceleration at take-off	Velocity	*Spatial shifting	Energy at landing	Symmetry of take-off
Height [cm]	*	0.51	0.67	0.52	-0.02	0.95	0.43	-0.25	0.95	0.21
Reserve [cm]	0.51	*	0.31	0.31	-0.02	0.51	0.19	0.08	0.51	0.11
Length [cm]	0.67	0.31	*	-0.19	-0.07	0.73	0.95	-0.21	0.80	0.00
Angle at take-off [°]	0.51	0.31	-0.19	*	0.00	0.49	-0.48	-0.09	0.40	0.28
Frequency of approach strides [strides/min]	-0.02	-0.02	-0.07	0.00	*	-0.04	-0.07	-0.13	-0.03	-0.02
Acceleration at take-off [g]	0.95	0.51	0.73	0.49	-0.04	*	0.48	-0.24	0.98	0.17
Velocity [km/h]	0.43	0.19	0.95	-0.48	-0.07	0.48	*	-0.18	0.57	0.04
Spatial shifting [°]	-0.25	0.08	-0.21	-0.09	-0.13	-0.24	-0.18	*	-0.23	-0.91
Energy at landing [kJ]	0.95	0.51	0.80	0.40	-0.03	0.98	0.57	-0.23	*	-0.18
Symmetry of take-off	0.21	0.11	-0.04	0.28	-0.02	0.17	0.04	-0.91	-0.18	*

* traits without normal distribution were correlated by Spearman's rank correlation

frequencies and regularities of different gaits were positive and mostly low amounting to 0.18 ($p=0.04$), 0.27 ($p=0.004$) and 0.36 ($p=0.0001$). Correlations between frequencies of different gaits were not statistically significant. Most correlations between gait frequencies and elevations were relatively high and negative, ranging between -0.31 and -0.51 ($p<0.0005$), except for one positive correlation between trot frequency and elevation (0.30; $p=0.001$).

Regularity connections between gaits were not statistically significant except for the correlation between walk and canter, which was moderate and negative (-0.39; $p=0.0001$). Elevation at canter was correlated at 0.21 ($p=0.02$) with trot elevation and at 0.59 ($p=0.0001$) with walk elevation. Elevations of walk and trot were independent.

5.3. Correlations between jumping and gait parameters

Data are presented in Table 5. The obtained results showed that correlations between walk and jumping parameters are statistically significant for 21 correlations out of the possible 27, however most of them were weak with three moderate values (above 0.3). Correlations above 0.3 were found only for walk regularity and jump height (0.33; $p=0.003$), acceleration of take-off (0.36; $p=0.008$) and energy by landing (0.35; $p=0.02$). Low positive correlations (0.24-0.29; $p<0.007$) were obtained for walk frequency and jumping parameters, as well as regularity of walk and three others jumping parameters (0.20-0.27; $p<0.01$). Low negative correlations were recorded for the elevation of walk and jumping parameters ranging from -0.17 to -0.25 ($p<0.03$). Statistically significant weak correlations between jumping and trot parameters were noted only for two parameters, being -0.17 ($p=0.004$) between approach frequency and elevation and 0.18 ($p=0.04$) for trot frequency and spatial shifting in jump.

A moderate correlation was obtained between frequencies of canter and approach jump strides (0.44; $p=0.006$). Canter regularity showed a low correlation (0.19; $p=0.003$) with frequency of jump approach strides. Negative correlations for jumping parameters and gallop characteristics were found between canter regularity and height of jump (-0.24; $p=0.003$) as well as elevation of canter and frequency of jump approach strides (-0.16; $p=0.004$).

Thus generally the frequency of jump approach strides was the jumping parameter mostly connected with gait parameters, being positively moderately correlated with canter frequency and low correlated positively with regularity and low negatively correlated with gait elevations. The parameters of jump size (height, reserve, length) were correlated mainly at a low level with walk regularity. The dynamic parameters, i.e. acceleration, velocity and energy at landing, were also mostly weakly positive connected with walk regularity and weakly negatively correlated with walk elevation. The regularity of walk was the parameter mostly weakly connected with the highest number of jumping parameters; however, the highest, moderate correlation was observed between canter frequency and approach frequency.

Table 4
Pearson's correlations between gait parameters and their significance (in bold for *P<0.05).

Gait parameters	Frequency of walk	Frequency of trot	Frequency of canter	Regularity of walk	Regularity of trot	Regularity of canter	Elevation at walk	Elevation at trot	Elevation at canter	Symmetry in trot
Frequency of walk [strides/min]	x	0.02	-0.15	0.70	0.18	-0.63	-0.40	0.30	0.14	0.14
Frequency of trot [strides/min]	0.02	x	0.04	-0.11	0.78	0.36	-0.51	0.06	-0.35	-0.35
Frequency of canter [strides/min]	-0.15	0.04	x	0.06	-0.18	0.27	-0.31	-0.54	-0.43	-0.52
Regularity of walk	0.70	-0.11	0.06	x	-0.13	-0.39	-0.36	-0.02	-0.01	-0.04
Regularity of trot	0.18	0.78	-0.18	-0.13	x	0.04	-0.46	0.56	-0.12	0.03
Regularity of canter	-0.63	0.36	0.27	-0.39	0.04	x	-0.18	-0.48	-0.64	0.32
Elevation at walk [cm]	-0.40	-0.51	-0.31	-0.36	-0.46	-0.18	x	0.12	0.59	0.43
Elevation at trot [cm]	0.30	0.06	-0.54	-0.02	0.56	-0.48	0.12	x	0.21	0.63
Elevation at canter [cm]	0.14	-0.35	-0.43	-0.01	-0.12	-0.64	0.59	0.21	x	0.11
Symmetry in trot [cm]	0.14	-0.35	-0.43	-0.01	-0.12	-0.64	0.59	0.21	0.11	x

Table 5
Partial correlations between gait and jumping parameters with their significance (in bold for *P<0.05).

Jump parameters	Frequency of walk	Frequency of trot	Frequency of canter	Regularity of walk	Regularity of trot	Regularity of canter	Elevation at walk	Elevation at trot	Elevation at canter	Symmetry in trot
Height [cm]	0.24	0.04	-0.07	0.33	0.03	-0.24	-0.18	0.01	0.14	0.14
Reserve [cm]	0.14	-0.06	-0.07	0.21	-0.01	-0.11	-0.13	0.06	0.06	0.06
Length [cm]	0.15	0.03	0.01	0.27	-0.05	-0.04	-0.10	-0.09	-0.02	-0.02
Angle at take off [°]	0.10	-0.08	0.11	0.04	0.07	-0.14	0.02	-0.04	0.05	0.05
Frequency of approach strides [strides/min]	-0.15	0.11	0.44	0.07	-0.08	0.19	-0.25	-0.17	-0.16	-0.16
Acceleration at take off [g]	0.29	0.06	0.09	0.36	-0.09	-0.15	-0.19	-0.14	0.03	0.03
Velocity [km/h]	0.07	-0.01	0.07	0.20	-0.03	-0.03	-0.05	-0.05	-0.01	-0.01
Spatial shifting [°]	0.04	0.18	0.11	0.00	0.17	0.14	-0.17	-0.03	0.11	0.11
Energy by landing [kJ]	0.27	-0.02	0.00	0.35	0.00	-0.17	-0.21	-0.08	0.03	0.03
Symmetry of take-off	0.14	-0.14	0.04	-0.06	-0.04	-0.14	0.19	0.14	0.05	0.05

6. Discussion

6.1. Correlations between jumping parameters

Jumping parameters are strongly connected with each other. Some correlations seem obvious based on general physics (velocity – acceleration - energy), while some are rather unexpected, e.g. a stronger correlation of jump reserve with jump length rather than jump height. The negative correlations of jump velocity with the jump take-off angle seem consistent with jumping rules and training guidance (FEI; <https://www.fei.org/stories/lifestyle/teach-me/two-grids-improve-jumping-technique>), as horses (especially older with enough strength and balance) jumping with a lower velocity usually can take off closer to the obstacle with a greater take-off angle. The other new jumping trait relationships, such as correlations of spatial shifting with the other traits seem less evident being mostly negatively correlated with many traits. However, the strongest opposite correlation with symmetry of take-off seems reasonable, as more loading on one limb by taking off can cause unequal movement. The more perpendicular the jump to the obstacle front, the better jumping characteristics are achieved, and this depends on the quality of the take-off measured by symmetry. The influence

could also be opposite – the rider's technique may influence jump spatial characteristics and its resulting jumping parameters. It is difficult to discuss this trait in more detail, as it had not been investigated earlier. The spatial shifting and its relationships may be strongly influenced by training progress and conditions (Lewczuk, 2008).

The research describing relationships between jumping traits was based on the linear evaluation of traits at their genetic level (Rovere et al. 2017). Surprisingly, all free jumping linear traits evaluated during inspections were negatively correlated at the genetic level with jumping performance (from -0.52 to -0.79). The possible explanation for such results could be provided by the influence of training progress, as these traits were recorded without riders. However, subjectively evaluated free jumping traits are highly correlated (0.92) with jumping performance (Hellsten et al., 2006).

Phenotypic correlations (Medeiros et al., 2020) concerning jumping traits evaluated by a linear scoring system (a more detailed descriptive system than the subjective judging point system, although still not measurable) underlined high correlations of limb biomechanics with overall impulsion and flexibility (0.15-0.46). These results cannot be compared directly using sensor data, as only reserve of limb above the obstacle can be calculated using the IMU system, which is not exactly the

same as overall limb biomechanics (angles, position, speed). However, measurable acceleration at take-off and energy at landing correlate with the reserve at the same high level (0.5) as traits described in the cited study. According to Medeiros et al. (2020), jump distance (not defined precisely) was highly correlated with the power of jump (0.48) and evaluation of canter (0.32). In our study the length of jump (probably connected with the above-mentioned distance trait) was even more significantly (0.67-0.95) correlated with comparable traits: height of jump, acceleration of take-off, velocity and energy at landing. Unexpectedly there are no correlations between canter traits and length of jump, which is not consistent with the cited study. That seem explainable as our horses are trained, specialised jumping horses, not young stallions described in the cited study, so gait potential of sport horses shows a wider range. Such results of different gaits suitable for a good jumping horse at the genetic level were also found based on the accelerometer measurements (Ricard et al., 2020).

6.2. Correlations between movement parameters

Obtained results seem less predictable, as according to the training rules jumping horses should be able to perform at least good canter. The characteristics of canter are underlined as important for jumping specialist horses (www.KWPN.org, www.PZHK.pl). According to our study, the characteristic of trot and walk is closely correlated, while canter is less correlated with the other gaits in the investigated group of horses. Comparable results were found for the traits evaluated according to the linear descriptive evaluation (Medeiros et al., 2020). Both in our study and in the cited results walk and trot characteristics were more closely correlated with one another than with canter characteristics.

Frequency and regularity evaluated in our study are strongly correlated for both gaits – walk and trot, which is not the case in canter. Such results may be connected with the symmetrical character of the two former gaits (Clayton, 2016). It is also underlined that the elevation of trot is characteristic for dressage horses (KWPN). In our study jumping horses had the elevations markedly correlated. The possible effect of the training level should not be significant in this case, because the data obtained for breeding using the accelerometer technology underlined that different types of gaits (working – medium gait being performed at a different training level) are correlated with each other (mostly above 0.6), being also higher for trot than for canter (Ricard et al., 2020). Because of the restricted amount of research in that field and other traits measured, the results cannot be compared directly. However, in the study cited above (Ricard et al., 2020) the correlations between stride frequency in walk and characteristics for displacements and activity in trot and canter were in the comparable range of values, from -0.04 up to 0.23, similarly as our results. The correlations between walk symmetry and the described trot and canter characteristics were much lower, ranging from -0.02 to 0.09. It can also be added that height at the withers was connected with acceleration movement results at an unequal, low level (Ricard et al., 2020). The group of our investigated horses was uniform in that respect.

The regularity and symmetry of trot should be correlated on a high level (Lewczuk and Maško, 2021), while in our study, there was no relationship between these parameters. The explanation came from the definitions of these parameters. As symmetry presented in our current study depended on the left/right limb ratio (as given by the device), and according to the plus/minus ratio value, it shows a specific limb, it facilitates sidedness comparison underlined as important (Ničová and Bartošová, 2022).

6.3. Correlations between jumping and gait parameters

Jump height and length are described as basic jump measurements (Janczarek and Kędzierski, 2011). As such, the connection with the descriptions of the jump parabola should be the most important item. The height of jump was correlated with walk regularity and frequency. A

low negative correlation was observed between jump height and canter regularity (-0.23). Such a result indicates that horse-rider pairs often perform a "strong, high" jump at the cost of losing regularity of stride in the approach. This situation may also take place when the horse is afraid of the obstacle, as a result of which the horse slows down and jumps too high. This correlation indicates that a strong, even irregular canter can facilitate a long jump. Corresponding results provided by the accelerometer technique were recorded by Ricard et al. (2020). The longitudinal activity (amount of deceleration and acceleration along the longitudinal horse axis) were correlated genetically at -0.22 with jumping performance. The genetic correlations do not always follow phenotypic ones; however, this relationship is based on the same background. The genetic correlations between gaits and jumping performance were estimated usually as medium and low (Ducro et al., 2007; Hellsten et al., 2006); however, higher values were always noted for canter than for walk or trot (0.28-0.43 vs. 0.06-0.14). Genetic correlations were also stronger than phenotypic ones (Ducro et al., 2007). Most scientific papers cover the subject of the genetic relationship between traits (evaluated in a linear, descriptive manner or subjective judging). That provides information on the genetic level of trait relationships, but is not as useful in the training evaluation as phenotypic correlations.

In our study jump reserve was weakly correlated with walk regularity (0.21). Walk regularity and frequency were also connected with jump length (0.2-0.3). These positive correlations between jumping reserve and length and gait regularity might indicate that jumping is connected with the health status, although it is not on a strong level. High horse gait regularity and symmetry indicated good health condition (Barrey et al., 1994). Probably that is why regularity of gaits, mainly walk regularity, is connected with many jumping traits (take-off acceleration - 0.36; jump velocity - 0.22; energy at landing - 0.35). That may also be connected with the horse temperament, as some papers underline the connections between jumping and temperament (Ruhlmann et al. 2009). Temperament seems expressible also in horse walk patterns.

According to literature data, jump success is determined during take-off (Powers, 2002). Take-off frequency was correlated with frequency of gallop (0.36) and walk (0.21), as well as canter regularity (0.28). The quality of the approach consists in such elements as regularity of strides – their regular rhythm also according to the practical guidelines (FEI- <https://www.fei.org/stories/lifestyle/teach-me/showjumping-exercises-improve-rhythm>). Our observation indicates that horses that approach the obstacle hurrying excessively do not make extensive jumps, as frequency of take-off is not correlated with jump length. Opposite data, although with some margins of standard error, were found in the linear traits describing the horse's jumping technique, as the stride of canter is less correlated at the phenotypic level with jump quality compared with impulsion (Ducro et al., 2007).

The spatial shift during the jump airborne phase correlated with trot frequency (0.22). This result may be related to the training progress. The more experienced a horse is (as indicated by the lower frequency of strides in the trot), the lesser the problem with the symmetry of jump, which may be related with accepting the rider's "leg-aid" and reacting to his body position. Negative, moderately strong correlations (-0.40) were found between other trot characteristics - elevation at trot and take-off frequency. This means that horses that trot too well have difficulty approaching the obstacle properly.

Negative correlations, lack of correlations or low correlations were found between gaits and jumping characteristics at the phenotypic level for the linear scoring system (Medeiros et al., 2020). Most of them were statistically non-significant (26 results out of 30 calculated), walk was connected with jumping at a low level of 0.1, while trot was negatively correlated at -0.13 - -0.17. Genetic correlations were higher and positive for the trot estimations.

Out of 100 calculated correlations in our study, 21 were statistically significant. Obtained results (correlations at approx. 0.3) support the hypothesis that some gait characteristics are connected with jump

quality. However, such correlations were low to moderate, especially for canter, which is treated in horse selection as a jump determinant. The relationships between gaits and jumping should be investigated further, as the amount of information on the environmental level is extremely low, especially when we take into consideration that training progress may change the discussed relationships. The regularity and symmetry increases in early training and then decreases after the age of six years (Barrey and Biau, 2002), which can influence results. Regular exercise testing implementation and monitoring of training sessions may have an important added value in the assessment of performance. That should be important also from the genetic point of view, as some relationships between traits seem highly varied and ambiguous (Rustin, 2017; Ricard et al., 2020), while the novel monitoring system based on sensors is accurate (Fries et al., 2017) and applicable (Gmel et al., 2020). Furthermore, differences between the line patterns used for dressage and show jumping horses are limited to a few specific characteristics (Duensing et al., 2014), thus different methods should be investigated in more detail.

6.4. Limitations

The limitation of the study is connected with the low number of horses. It is difficult to find many high class riders and different aged horses trained under comparable conditions. Further research should solve this problem. The other limitation is connected with the unknown error of the Seaver measurements. The device being commercially produced is expected to generate the same error with every use, so the data received for the same equipment will be fully comparable. All the groups and horses were measured using the same device and the possible bias is the same for all the horses. Discussed limitations influence the power of our results, which should be treated as preliminary. The presented study is the first step to further analysis of a higher amount of horse data. More data or an additional group of less specialised horses can change the meaning of the current results. Future studies and research comparisons would benefit from scientific validation of the Seaver system. However, a highly equipped horse biomechanical laboratory is required for such a process.

6.5. Development and practical aspect

Investigations in this direction should be carried out, as it was stated at the genomic level that walk characteristics (evaluated objectively using accelerometers) are connected with the functional longevity of horses (Dugue et al., 2021). In equestrian sports, measured new parameters can also have a significant impact on the monitoring activity time budgets (Maisonpierre et al., 2019). Objectivization of the biomechanics of jump (both during competition and training) is aimed at a precise selection of loads and maintaining a high health status of horses in training (Fercher, 2017).

Obtained results indicate that highly correlated jumping traits describe closely related movement processes. It seems that measurements of the limited number of jump characteristics facilitate the prediction of other jumping characteristics. Less correlated gait movement characteristics indicate that horse gaits can have different qualities in different gaits. This underlines the need for observation of all gaits by selecting future horse usage. Walk regularity and canter frequency are movement parameters informative for the jumping skills. However, the high of these relationships does not allow for unambiguous prediction.

7. Conclusion

Jumping characteristics are more strongly correlated with each other than gaits parameters, so in the horse selection for the discipline each gait should be evaluated and taken into account. In contrast to common opinions, canter parameters cannot determine jump characteristics in sport jumping horses. Canter frequency is the only parameter correlated

with the frequency of the approach strides at the low-medium level. Walk regularity is correlated with some jumping parameters above 0.3, probably because of the temperament or health issues. On the basis of this preliminary research it seems difficult to predict horse jumping skills on the basis of movement characteristics. Contrary to the current opinion that take-off determines other jump characteristics – the frequency of approach strides cannot determine any of the jumping parameters, as well as take-off angle (some correlations are even approx. 0.5). The symmetry of take-off can regulate airborne spatial shifting. The relationship between gait frequency and regularity is higher in symmetrical walk and trot than in asymmetrical canter. Trot symmetry being extremely important in lameness diagnosis seems negatively correlated with frequency and positively with limb elevation, which could be taken into account by the lameness evaluation. Further research on larger amount of the data should be provided for a more detailed analysis of different effects influencing horse performance. Underlined movement-jumping traits correlations were significant from the statistical point and observed as mostly low positive and negative values. Currently, calculated correlations between movement and jumping traits do not allow for predicting performance, but the relationships obtained in statistical analysis seem informative.

Author Contribution

Idea - BK, DL, review of literature - BK, data collection - BK, data analysis - BK, DL, writing original draft – BK, DL; critical review of the manuscript – DL

Declaration of Competing Interest

None.

Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at doi:10.1016/j.livsci.2022.105112.

References

- Akoglu, H., 2018. User's guide to correlation coefficients. *Tur. J. Emerg. Med.* 18 (3), 91–93. <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>.
- Barrey, E., Hermelin, M., Vaudelin, J.L., Poirer, D., Valette, J.P., 1994. Utilisation of an accelerometer device in equine gait analysis. *Equine Vet. J.* 26 (S17), 7–12. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1994.tb04864.x>.
- Barrey, E., Biau, S., 2002. Locomotion of dressage horses. In: *Proceedings of the Conference on Equine Sports Medicine and Science 2002*, pp. 17–32. *The Elite Dressage and Three-Day-Event horse*.
- Bartolomé, E., Sánchez, M.J., Molina, A., Schaefer, A.L., Cervantes, I., Valera, M., 2013. Using eye temperature and heart rate for stress assessment in young horses competing in jumping competitions and its possible influence on sport performance. *Animal* 7 (12), 2044–2053. <https://doi.org/10.1017/s1751731113001626>.
- Becker, K., Lewczuk, D., 2020. Wykorzystanie akcelerometru i żyroskopu w badaniach biomechanicznych koni. *Med. Wet.* 76 (12) <https://doi.org/10.21521/mw.6481>.
- Becker, A.C., Stock, K.F., Distl, O., 2013. Correlations of unfavorable movement characteristics in warmblood foals and mares with routinely assessed conformation and performance traits. *Animal* 7 (1), 11–21. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001322>.
- Clayton, H.M., 2016. Horse species symposium: Biomechanics of the exercising horse. *J. Anim. Sci.* 94 (10), 4076–4086. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9990>.
- Clayton, H.M., Hobbs, S.J., 2017. The role of biomechanical analysis of horse and rider in equitation science. *Appl. Anim. Beh. Sci.* 190, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.02.011>.
- de Godoi, F.N., de Almeida, F.Q., Toral, F.L.B., de Miranda, A.L.S., Kaipper, R.R., Bergmann, J.A.G., 2014. Repeatability of kinematics traits of free jumping in Brazilian sport horses. *Livest. Sci.* 168, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.07.014>.
- Ducro, B.J., Koenen, E.P.C., Van Tartwijk, J.M.F.M., Bovenhuis, H., 2007. Genetic relations of movement and free-jumping traits with dressage and show-jumping performance in competition of Dutch Warmblood horses. *Livest. Sci.* 107 (2-3), 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.09.018>.
- Duensing, J., Stock, K.F., Krieter, J., 2014. Implementation and prospects of linear profiling in the Warmblood horse. *J. Equine Vet. Sci.* 34 (3), 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2013.09.002>.

- Dugué, M., Dumont Saint Priest, B., Crichan, H., Danvy, S., Ricard, A., 2021. Genomic Correlations Between the Gaits of Young Horses Measured by Accelerometry and Functional Longevity in Jumping Competition. *Front. Genet.* 23. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.619947>.
- Fercher, C., 2017. The biomechanics of movement of horses engaged in jumping over different obstacles in competition and training. *J. Equine Vet. Sci.* 49, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.jvevs.2016.10.002>.
- Fries, M., Montavon, S., Spadavecchia, C., Levionnois, O.L., 2017. Evaluation of a wireless activity monitoring system to quantify locomotor activity in horses in experimental settings. *Equine Vet. J.* 49 (2), 225–231. <https://doi.org/10.1111/evj.12568>.
- Gego, A., 2006. Course design, 1st edition. J.A. Allen, London, UK.
- Gmel, A.I., Gmel, G., von Niederhäusern, R., Weishaupt, M.A., Neuditschko, M., 2020. Should we agree to disagree? An evaluation of the inter-rater reliability of gait quality traits in Franches-Montagnes stallions. *J. Equine Vet. Sci.* 88, 102932 <https://doi.org/10.1016/j.jvevs.2020.102932>.
- Gregić, M., Baban, M., Mijić, P., Gantner, V., Bobić, T., 2021. The challenges of jumping horses through the training. In: *Proceedings of the 13th International Symposium Modern Trends in Livestock Production* October 6–8, 2021. Belgrade, Serbia, pp. 541–551.
- Gregić, M., Baban, M., Mijić, P., Bobić, T., Antunović, B., Pejić, M., 2016. Training Horses in Show Jumping Equestrian Sports. In: *5th International Symposium "AgroReS"*, p. 196–196.
- Hellsten, E.T., Viklund, Å., Koenen, E.P.C., Ricard, A., Bruns, E., Philipsson, J., 2006. Review of genetic parameters estimated at stallion and young horse performance tests and their correlations with later results in dressage and show-jumping competition. *Livest. Sci.* 103 (1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.01.004>.
- Hellsten, E.T., Jorjani, H., Philipsson, J., 2009. Genetic correlations between similar traits in the Danish and Swedish Warmblood sport horse populations. *Livest. Sci.* 124 (1–3), 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.11.021>.
- Ingólfssdóttir, H.B., Sigurjónsdóttir, H., 2008. The benefits of high rank in the wintertime—a study of the Icelandic horse. *Appl. Animal Behav. Sci.* 114 (3–4), 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2008.04.014>.
- Janczarek, I., 2011. Obiektywizacja metod oceny skoków luzem młodych ogierów półkrwi. [Objectivisation of free jumping evaluation for young warmblood stallions]. Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie. DSc dissertation. *Rozprawy Naukowe* 352.
- Janczarek, I., Wilk, I., Bocian, K., 2012. Analysis of different horse breeds' approach to an obstacle. *Ann. UMCS, Zootechnica* 30 (2). <https://doi.org/10.2478/v10083-012-0008-y>.
- Janczarek, I., Stachurska, A., Wilk, I., 2013. Correlation between kinematic parameters of the free jumping horse in the first approach stride. *Acta Agric. Scand. Sect. A–Anim. Sci.* 63 (2), 57–67. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.785584>.
- Koizumi, N., Inoue, Y., Ninomiya, R., Fujita, D., Tsukamoto, T., 1989. Relationship of cadmium accumulation to zinc or copper concentration in horse liver and kidney. *Environ. Res.* 49 (1), 104–114. [https://doi.org/10.1016/s0013-9351\(89\)80025-8](https://doi.org/10.1016/s0013-9351(89)80025-8).
- Léguillette, R., Bond, S.L., Lawlor, K., Haan, T.D., Weber, L.M., 2020. Comparison of physiological demands in Warmblood show jumping horses over a standardized 1.10 m jumping course versus a standardized exercise test on a track. *BMC Vet. Res.* 16 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12917-020-02400-9>.
- Lewczuk, D., Słoniewski, K., Reklewski, Z., 2006. Repeatability of the horse's jumping parameters with and without the rider. *Livest. Sci.* 99 (2–3), 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.06.008>.
- Lewczuk, D., Wejer, J., Sobieraj, D., 2007. Analysis of angles of taking off, landing, and work of limbs in horses jumping above the spread obstacle of different structure. *Anim. Sci. Pap. Rep.* 25 (4), 297–304.
- Lewczuk, D., 2008. Young horse response on changing distance in free jumping combination. *Animal* 2 (11), 1651–1657. <https://doi.org/10.1017/S1751731108002863>.
- Lewczuk, D., Ducro, B., 2012. Repeatability of free jumping parameters on tests of different duration. *Livest. Sci.* 146 (1), 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.02.016>.
- Lewczuk, D., 2013. Effect of the judge and definition of the trait for horse free jumping evaluation. *Archiv. Anim. Breed.* 56 (1), 638–649. <https://doi.org/10.7482/0003-9438-56-064>.
- Lewczuk, D., Maško, M., 2021. Symmetry and regularity of recreation horse during treadmill training. *Livest. Sci.* 254, 104773 <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104773>.
- Lin, J., Yang, A., Shah, A., 2010. Using SAS® to Compute Partial Correlation. *PharmaSUG2010-Paper SP01*.
- Maisonpierre, I.N., Sutton, M.A., Harris, P., Menzies-Gow, N., Weller, R., Pfau, T., 2019. Accelerometer activity tracking in horses and the effect of pasture management on time budget. *Equine Vet. J.* 51 (6), 840–845. <https://doi.org/10.1111/evj.13130>.
- Medeiros, B.R., Garbade, P., Seixas, L., Peripolli, V., McManus, C., 2020. Brazilian Sport Horse: genetic parameters for approval of Brasileiro de Hipismo stallions. *Trop. Anim. Health Prod.* 52 (4), 1669–1680. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02168-7>.
- Molina, A., Valera, M., Dos Santos, R., Rodero, A., 1999. Genetic parameters of morphofunctional traits in Andalusian horse. *Livest. Prod. Sci.* 60 (2–3), 295–303. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00101-3).
- Ničová, K., Bartošová, J., 2022. Still beyond a chance: Distribution of faults in elite show-jumping horses. *PLoS one* 17 (3), e0264615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264615>.
- Olsson, E.G., Arnason, T., Näsholm, A., Philipsson, J., 2000. Genetic parameters for traits at performance test of stallions and correlations with traits at progeny tests in Swedish warmblood horses. *Livest. Prod. Sci.* 65 (1–2), 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00176-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00176-1).
- Powers, P.N.R., Harrison, A.J., 1999. Models for biomechanical analysis of jumping horses. *J. Equine Vet. Sci.* 19 (12), 799–806. [https://doi.org/10.1016/S0737-0806\(99\)80172-5](https://doi.org/10.1016/S0737-0806(99)80172-5).
- Powers, P., 2002. The take off kinematics of jumping horses in a puissance competition. In: *ISBS-Conference Proceedings Archive*, pp. 152–155.
- Ricard, A., Bruns, E., Cunningham, E.P., 2000. Genetics of Performance. *The genetics of the horse*, p. 411. ISBN 0 85199 117 3.
- Ricard, A., Dumont Saint Priest, B., Danvy, S., Barrey, E., 2020. Accelerometers Provide Early Genetic Selection Criteria for Jumping Horses. *Front. Genet.* 11, 448. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00448>.
- Rothmann, J., Christensen, O.F., Søndergaard, E., Ladewig, J., 2014. Behavior observation during conformation evaluation at a field test for Danish Warmblood horses and associations with rideability and performance traits. *J. Equine Vet. Sci.* 34 (2), 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.jvevs.2013.06.007>.
- Rovere, G., Ducro, B.J., van Arendonk, J.A.M., Norberg, E., Madsen, P., 2017. Genetic correlations between dressage, show jumping and studbook-entry inspection traits in a process of specialization in Dutch Warmblood horses. *J. Anim. Breed. Genet.* 134 (2), 162–171. <https://doi.org/10.1111/jbg.12241>.
- Ruhlmann, C., Janssens, S., Philipsson, J., Thorén-Hellsten, E., Crolley, H., Quinn, K., Ricard, A., 2009. Genetic correlations between horse show jumping competition traits in five European countries. *Livest. Sci.* 122 (2–3), 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.09.006>.
- Rustin, M., Janssens, S., Buys, N., Gengler, N., 2009. Multi-trait animal model estimation of genetic parameters for linear type and gait traits in the Belgian warmblood horse. *J. Anim. Breed. Genet.* 126 (5), 378–386. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2008.00798.x>.
- Rustin, M., 2017. *Sport, Spectacle and Society: Understanding the Olympics. Olympic Cities: 2012 and the Remaking of London*, pp. 21–40. ISBN 978 0 7546 7100 8.
- Santamaría, S., Bobbert, M.F., Back, W., Barneveld, A., Weeren, P.R., 2004. Variation in free jumping technique within and among horses with little experience in show jumping. *Amer. J. Vet. Res.* 65 (7), 938–944. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.938>.
- Santamaría, S., Bobbert, M.F., Back, W., Barneveld, A., van Weeren, P.R., 2005. Effect of early training on the jumping technique of horses. *Amer. J. Vet. Res.* 66 (3), 418–424. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2005.66.418>.
- Shimada, M., Suzuki, N., 2020. The contribution of mutual grooming to affiliative relationships in a feral Misaki horse herd. *Animals* 10 (9), 1564. <https://doi.org/10.3390/ani10091564>.
- Topolinski, K., 2013. *The Mathematics of Horses*. California State University. <http://hdl.handle.net/10211.3/75794>.
- Wolfamm, I.A., Meulenbroek, R.G.J., 2012. Co-variations between perceived personality traits and quality of the interaction between female riders and horses. *Appl. Animal Behav. Sci.* 139 (1–2), 96–104. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1016/j.applanim.2012.03.006>.

14.1. Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Oświadczenie Autora rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Katarzyna Becker
Wydział Hodowli i Biologii Zwierząt;
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, iż mój wkład autorski w niżej wymienionych artykułach naukowych stanowiących cykl publikacji rozprawy doktorskiej był następujący*:

1. Becker, K., Lewczuk, D. (2020). Wykorzystanie akcelerometru i żyroskopu w badaniach biomechanicznych koni. *Medycyna Weterynaryjna*, 76(12). DOI: <http://dx.doi.org/10.21521/mw.6481>, pkt. 40, Impact Factor: 0,383.
Wykonane zadania przez Doktoranta w ramach artykułu (70%):
 - a) przegląd literatury,
 - b) opracowanie pierwszej wersji pracy,
 - c) autor korespondencyjny.
2. Becker, K., Lewczuk, D. (2022). Variability of Jump Biomechanics Between Horses of Different Age and Experience Using Commercial Inertial Measurement Unit Technology. *Journal of Equine Veterinary Science*, 119, 104146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104146>, pkt. 70, Impact Factor: 1,313.
Wykonane zadania przez Doktoranta w ramach artykułu (60%):
 - a) współtwórca metodologii,
 - b) przegląd literatury,
 - c) zebranie danych: pomiar parametrów treningu roboczego,
 - d) współudział w opracowaniu statystycznym wyników,
 - e) opracowanie pierwszej wersji pracy, współudział w redakcji dalszych wersji.
3. Becker, K., Lewczuk, D. (2022). Phenotypic correlations between jump and gaits characteristics measured by inertial measurement units in horse jumping training-preliminary results. *Livestock Science*, 266, 105112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105112>, pkt. 140, Impact Factor: 1,929.
Wykonane zadania przez Doktoranta w ramach artykułu (60%):
 - a) współtwórca metodologii,
 - b) przegląd literatury,
 - c) zebranie danych: pomiar parametrów treningu roboczego,
 - d) współudział w opracowaniu statystycznym wyników,
 - e) opracowanie pierwszej wersji pracy, współudział w redakcji dalszych wersji.

Bydgoszcz, 15.03.2023
miejsowość, data

Katarzyna Becker
Podpis Autora rozprawy doktorskiej

Beata Lomercle
Podpis promotora

* W przypadku prac dwu- lub wieloautorskich wymagane są oświadczenia kandydata do stopnia doktora oraz współautorów, wskazujące na ich merytoryczny wkład w powstaniu każdej pracy (np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań – np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie ankiet itp., wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu i inne). Określenie wkładu danego autora, w tym kandydata do stopnia doktora, powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej pracy.

14.2. Oświadczenie współautorów artykułów naukowych

Oświadczenie Współautora

Dr hab. inż. Dorota Lewczuk Prof. IGBZ
Instytut Genetyki i Biotechnologii Zwierząt PAN w Jastrzębcu

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, iż mój wkład autorski w niżej wymienionych artykułach naukowych stanowiących cykl publikacji rozprawy doktorskiej był następujący*:

1. Becker, K., Lewczuk, D. (2020). Wykorzystanie akcelerometru i żyroskopu w badaniach biomechanicznych koni. *Medycyna Weterynaryjna*, 76(12). DOI: <http://dx.doi.org/10.21521/mw.6481>, pkt. 40, Impact Factor: 0,383.
Wykonane zadania w ramach artykułu (30%):
 - a) przegląd literatury,
 - b) współredakcja pracy, krytyczna recenzja pracy.
2. Becker, K., Lewczuk, D. (2022). Variability of Jump Biomechanics Between Horses of Different Age and Experience Using Commercial Inertial Measurement Unit Technology. *Journal of Equine Veterinary Science*, 119, 104146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104146>, pkt. 70, Impact Factor: 1,313.
Wykonane zadania w ramach artykułu (40%):
 - a) współtwórca metodologii,
 - b) współudział w opracowaniu statystycznym wyników,
 - c) współredakcja pracy, krytyczna recenzja pracy.
 - d) autor korespondencyjny.
3. Becker, K., Lewczuk, D. (2022). Phenotypic correlations between jump and gaits characteristics measured by inertial measurement units in horse jumping training-preliminary results. *Livestock Science*, 266, 105112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105112>, pkt. 140, Impact Factor: 1,929.
Wykonane zadania w ramach artykułu (40%):
 - a) współtwórca metodologii,
 - b) współudział w opracowaniu statystycznym wyników,
 - c) współredakcja pracy, krytyczna recenzja pracy,
 - d) autor korespondencyjny.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie wyżej wymienionych prac przez mgr inż. Katarzynę Becker jako część rozprawy doktorskiej opartej na zbiorze opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych.

Jastrzębiec 15.03.2023
miejsowość, data

Dorota Lewczuk
Podpis Współautora

* W przypadku prac dwu- lub wieloautorskich wymagane są oświadczenia kandydata do stopnia doktora oraz współautorów, wskazujące na ich merytoryczny wkład w powstanie każdej pracy (np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań – np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie ankiet itp., wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu i inne). Określenie wkładu danego autora, w tym kandydata do stopnia doktora, powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej pracy.