This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0. It is allowed to download this work and share it with others, but you must give credit, and you can't change it in any way or use it commercially.

Erasmus+

Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools

TEACH

MODUŁ:

PODSTAWY BIOMECHANIKI W ZAKRESIE UKŁADU NARZĄDU RUCHU

Jednostka dydaktyczna D: TECHNIKI ANALIZY RUCHU I SIŁ

D.2. Jak można mierzyć siłę i jakie parametry można analizować? Jakie są główne zastosowania takich pomiarów?

Politechnika Śląska
IBV INSTITUTO DE BIOMECÁNICA DE VALENCIA
VNIVERSITAT DE VALÈNCIA
AMSE THE ASSOCIATION OF MEDICAL SCHOOLS IN EUROPE

Spis treści

1. WPROWADZENIE I CELE 2

2. SIŁY REAKCJI 4

Platformy dynamometryczne....4

Akcelerometry 7

3. NACISK 11

Platformy nacisku 12

Wkładki pomiarowe 12

Inne systemy 14

4. SIŁA MIĘŚNIOWA 17

Dynamometry....17

5. GŁÓWNE OBSZARY ZASTOSOWAŃ 23

Aspekty kliniczne....23

Sport 23

Ergonomia 24

6. PRZYKŁADY 25

7. GŁÓWNE ZAGADNIENIA 32

8. BIBLIOGRAFIA 33

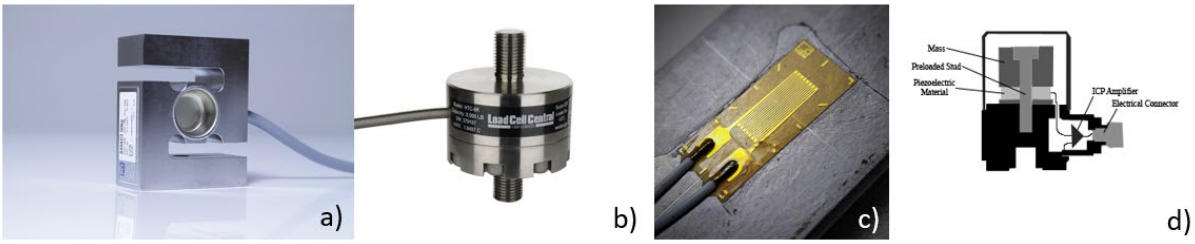
1. Wprowadzenie i cele

Wiedza na temat siły wywieranej przez ciało na inne ciało lub wiedza na temat obciążenia wywieranego na inny obiekt ma ogromne znaczenie w wielu badaniach biomechanicznych. Stosowane techniki opierają się na analizie ruchu, badaniu materiałów, rozwoju implantów, itp. Podobnie jak w przypadku innych technik, ważne jest, aby znać obiekt, który ma być mierzony, aby wybrać najbardziej odpowiednie urządzenie, biorąc pod uwagę czynniki takie jak amplituda i zakres częstotliwości akwizycji, liniowość, precyzja, niezawodność i czułość [1].

W analizie biomechanicznej zazwyczaj stosuje się techniki ilościowe wykorzystujące czujniki elektromechaniczne, zazwyczaj zawierające przetworniki, które przekształcają jedną formę energii w inną. W przypadku analizy siły, przetworniki siły przekształcają fizyczne wielkości siły, ciśnienia lub momentów w kwantyfikowalną wielkość elektryczną, która może być analizowana przez komputer; to znaczy, że dostarczają one sygnał elektryczny proporcjonalny do siły przyłożonej do czujnika [2]. Istnieje wiele rodzajów czujników o własnych cechach mechanicznych i właściwościach (czułość, czas odpowiedzi, zakres pomiarowy itp.) dotyczących pomiaru siły, takich jak czujniki piezoelektryczne, piezorezystancyjne, pojemnościowe, tensometryczne, etc.

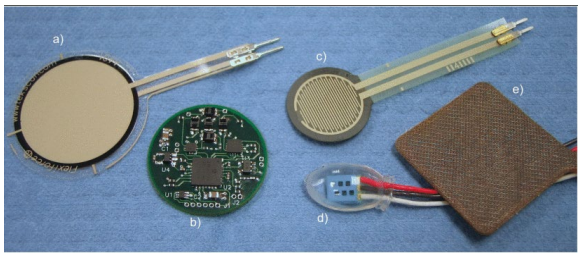
Na rynku dostępne są dwa główne rodzaje czujników siły: czujniki wyposażone w ogniwa obciążnikowe oraz czujniki wyposażone w rezystory do pomiaru małych sił (FSR).

Ogniwa obciążnikowe można podzielić na te oparte na tensometrach lub czujnikach piezoelektrycznych (Rysunek 1). W przypadku czujników tensometrycznych są one przyklejane do belki lub elementu konstrukcyjnego, który ugina się natychmiast po przyłożeniu siły. Przetworniki piezoelektryczne działają w oparciu o efekt piezoelektryczny. Do tego typu czujników wykorzystuje się monokryształy, które wytwarzają ładunek elektryczny pod wpływem naprężeń mechanicznych [1].



Rysunek 1 – Przykłady różnych czujników obciążnikowych: a) i b); tensometru: c), oraz schemat czujnika piezorezystancyjnego: d).

Czujniki FSR (Rysunek 2) są bardzo często stosowanymi urządzeniami w pomiarach biomechanicznych, szczególnie w tych związanych z analizą rozkładu ciśnienia na styku segmentu ciała i obiektu. Czujniki te są niedrogie, niewielkie, a kondycjonowanie sygnału jest proste [3].

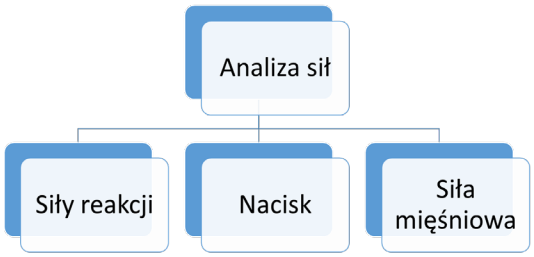


Rysunek 2 - Przykłady różnych rezystorowych czujników siły: a) Tekscan Flexiforce A401-25 FSR. b) Sandia Optical 3D czujnik siły. c) Interlink 402 FSR. d) Sandia Bubble czujnik. e) Pressure Profiles C500 czujnik pojemnościowy; pobrane z Dabling et al. [3].

Niniejszy materiał dydaktyczny koncentruje się przede wszystkim na następujących zagadnieniach:

- Główne grupy technik analizy siły.
- Jak działają te techniki i jakich informacji dostarcza sprzęt.
- Główne zalety i wady ich stosowania.
- Obszary, w których stosuje się dynamiczne techniki instrumentalne do analizy biomechanicznej.
- Przykłady zastosowania i systemów opartych na tego typu technikach instrumentalnych.

Aby ułatwić zrozumienie i naukę wskazanych technik, poniżej zaproponowano ogólną ich klasyfikację ze względu na cel wykonywanych pomiarów (rys. 3).



Rysunek 3 - Przykład ogólnej klasyfikacji systemów analizy sił.

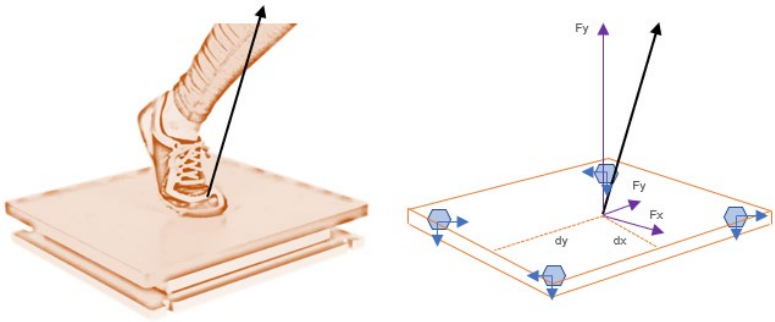
2. Siły reakcji

Czasami zachodzi potrzeba oceny sił wywieranych przez ciało ludzkie w kontakcie z podłożem podczas typowych ruchów, takich jak chód czy bieg. Z tego powodu zastosowanie technik instrumentalnych, takich jak platformy dynamometryczne i akcelerometry, generuje wyniki numeryczne pomiarów uderzeń, tłumienia i rejestracji sił reakcji.

Platformy dynamometryczne

Platforma dynamometryczna jest urządzeniem elektronicznym, które pozwala na analizę obciążenia wywieranego przez osobę badaną na płaskiej powierzchni, zazwyczaj na poziomie podłoża.

Najbardziej powszechną siłą wywieraną na ciało jest siła reakcji podłoża (ang. ground reaction force GRF), która działa na stopę podczas różnych ruchów, takich jak stanie, chodzenie czy bieganie. Siła ta, o takiej samej wielkości, lecz w kierunku przeciwnym do siły wywieranej przez osobę, jest rejestrowana i analizowana przez platformę dynamometryczną. Siły są wielkościami wektorowymi, ponieważ nie mogą być określane jedynie na podstawie ich wartości: konieczna jest również znajomość ich kierunku. Dlatego też będą one przedstawiane i traktowane jako wektory. Wektor siły reakcji jest trójwymiarowy i składa się ze składowej pionowej oraz dwóch składowych ścinających, które działają na powierzchnię platformy [2].



Rysunek 4 - Przedstawienie siły reakcji podczas wchodzenia na platformę siłową przy użyciu czterech czujników tensometrycznych; siła jest podzielona na trzy osie przestrzeni, jak również współrzędne punktu przyłożenia.

Platformy dynamometryczne składają się zazwyczaj z następujących elementów:

- Sztywna, płaska, statyczna powierzchnia znajdująca się na poziomie gruntu, o różnych wymiarach w zależności od przeznaczenia.
- Czujniki lub przetworniki umieszczone na spodzie platformy w celu zbierania informacji o przyłożonym obciążeniu.
- Oprogramowanie do analizy sygnału z tych czujników i przekształcania go w wyniki liczbowe i graficzne, które można interpretować.

Ogólnie rzecz biorąc, obecne platformy wykorzystują cztery trójosiowe przetworniki zwane ogniwami obciążnikowymi, zamontowane na czujnikach tensometrycznych lub piezorezystancyjnych, umieszczone w każdym z czterech narożników platformy. Proces obliczeniowy, który wykorzystuje informacje z każdego czujnika, dostarcza informacji o trzech składowych siły reakcji (Fx, Fy i Fz), momencie skręcającym na platformie (M) oraz współrzędnych środka nacisku (CoP), gdzie zakłada się, że występuje punkt przyłożenia obciążenia (rys. 4).

W ramach procesu produkcyjnego, tj. jeszcze przed jego użytkowaniem, obliczany jest współczynnik konwersji napięcia na siłę, a następnie sprzęt jest kalibrowany w celu określenia błędu pomiarowego. Proces ten jest wykonywany regularnie zgodnie z zaleceniami producenta jako środek zapobiegawczy w celu zapewnienia prawidłowości pomiarów. Biorąc pod uwagę, że zjawiska takie jak rozszerzanie, kurczenie lub tarcie mają wpływ na czujniki ze względu na ich mechaniczną konstrukcję, zwykle przeprowadza się wstępne tarowanie. Tarowanie to polega na nadaniu wartości zerowej wartości rejestrowanej przez platformę przed zarejestrowaniem sił ruchu.

W zależności od planowanego zastosowania platform, najważniejsze cechy, które należy wziąć pod uwagę to:

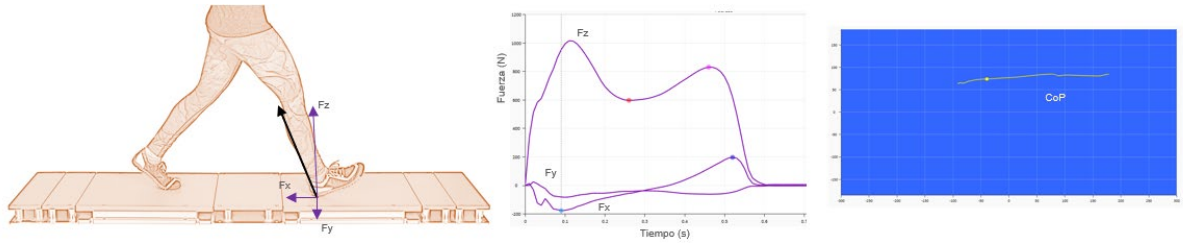
- Zakres pomiarowy. Im większy zakres, tym większa uniwersalność, ponieważ platforma może być stosowana przy ruchach wymagających użycia dużych sił (skoki, sport) oraz małych sił (chód, stanie); jednak zwiększenie zakresu wpływa na dokładność urządzenia.
- Przeciążenie. Jest to maksymalna siła, jaką może wytrzymać platforma, przy czym jest ona większa niż zakres pomiarowy.
- Przeskok. Oznacza pomiar siły na osi innej niż oś rzeczywistego zastosowania. Im mniejsza czułość poprzeczna, tym mniejszy błąd pomiarowy platformy.
- Częstotliwość naturalna lub rezonans mechaniczny. Im wyższa częstotliwość, tym większa wrażliwość na nagłe zmiany sił, takie jak te występujące podczas skoków lub gwałtownych ruchów, np. o charakterze sportowym. Jednakże, platforma o wysokiej częstotliwości drgań własnych może nie mierzyć poprawnie pomiarów przy niskich częstotliwościach. Ważne jest, aby zapewnić, że platforma mierzy stałe siły, od częstotliwości 0 Hz.

Sprzęt ten może być zamontowany na bieżni, ale tego typu platformy mają ograniczenia, ponieważ rodzaj płyty siłowej, która może być zintegrowana z bieżnią zazwyczaj mierzy tylko siły w kierunku pionowym w oparciu o kontakt stóp z podłogą [1]. Ponadto, istnieją również przenośne platformy, które mogą być przenoszone i instalowane w różnych warunkach środowiskowych, jednak badanie niektórych ruchów może być trudne, ponieważ nie są one osadzone w zagłębieniu umożliwiającym umieszczenie ich na poziomie gruntu.

Obecnie systemy platform dynamometrycznych są bardzo szeroko stosowane w różnych dziedzinach, takich jak środowisko kliniczne i sport. Niektóre przykłady obejmują Kistler 3D Force Plate (https://www.kistler.com/en/product/type-9281e/), trójwymiarową platformę siłową opartą na kwarcowych przetwornikach piezoelektrycznych; AMTI Force Platform System (https://www.amti.biz/optima.aspx), która oferuje szereg platform opartych na tensometrach do pomiaru siły w trzech wymiarach; Dinascan/IBV (http://analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/dinascan-ibv.html) trójwymiarowe platformy dynamometryczne z ekstensometrycznymi przetwornikami siły umieszczonymi pod czterema rogami platformy i zorientowanymi po dwa w kierunku przednio-tylnym i środkowo-bocznym.

Parametry

Typowe parametry pozyskiwane z platform siłowych to **punkt przyłożenia** we współrzędnych 2D w stosunku do płaszczyzny pomiarowej, **wielkość** w niutonach (N) lub kilogramach (kg) **wektor siły** w osiach przestrzennych (x,y,z) (rys. 5) oraz moment skręcający w X (x) generowany na platformie.



Rysunek 5 - Wizualizacja trzech składników siły reakcji i przedstawienie punktu przyłożenia (CoP) siły reakcji na platformie podczas chodu.

Zalety i wady

Pomimo wielu różnych cech tego sprzętu, platforma siłowa nie jest w stanie dostarczyć informacji na temat rozkładu siły reakcji na powierzchni, takiej jak stopa. Z tego powodu opracowano inne systemy analizy rozkładu sił, takie jak wkładki z oprzyrządowaniem lub platformy naciskowe, które zostały opisane w dalszej części niniejszej jednostki.

W niektórych obszarach, takich jak środowisko kliniczne, stosuje się bardziej ekonomiczne i uniwersalne rozwiązania, pomimo ich ograniczeń, ponieważ urządzenia te wiążą się z wysokimi kosztami i złożonością użycia.

Jednym z takich urządzeń jest platforma WII firmy Nintendo® (rys. 6). System ten wykorzystuje platformę siłową (Nintendo® WII Balance BoardTM), która dostarcza informacji o przemieszczeniu środka nacisku (CoP) na podstawie kontaktu stóp z platformą. Cztery czujniki umieszczone w narożnikach platformy oceniają rozkład masy ciała, szacując położenie środka ciężkości na osi x i y, rejestrując pionową siłę reakcji.

Rysunek 6 - Nintendo® Wii Balance Board™

Mimo, że system ten posiada mniej funkcji niż tradycyjna platforma dynamometryczna, szczególnie w odniesieniu do oceny szybkich ruchów wymagających dużej siły, takich jak skoki i biegi, oferuje on szeroki zakres zastosowań, głównie jako narzędzie do rehabilitacji w

zakresie równowagi, dostarczając interesujących informacji w badaniach różnych populacji, programów treningowych, itp.

W ostatnich latach opublikowano wiele prac dotyczących jej zastosowań klinicznych, takich jak monitorowanie poprawy równowagi po programach treningowych w określonych populacjach, a także na temat ich ważności i wiarygodności w ocenie kontroli posturalnej. W tym zakresie, różne badania oceniają ograniczenia i funkcjonalności tego systemu w warunkach klinicznych (Severini i wsp., 2017 "Use of Nintendo Wii Balance Board for posturographic analysis of Multiple Sclerosis patients with minimal balance impairment"; Weaver i wsp., 2017 "Use of the Nintendo Wii Balance Board for Studying Standing Static Balance Control: Technical Considerations, Force-Plate Congruency, and the Effect of Battery Life"; Clark i wsp.,2018 "Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review").

Akcelerometry

Akcelerometry to czujniki, które przekładają przyspieszenie na sygnał elektryczny. Ogólnie rzecz biorąc, ich działanie opiera się na bezwładności masy umieszczonej w czujniku siły, zgodnie z drugim prawem Newtona (F = m x a) w celu uzyskania przyspieszenia.

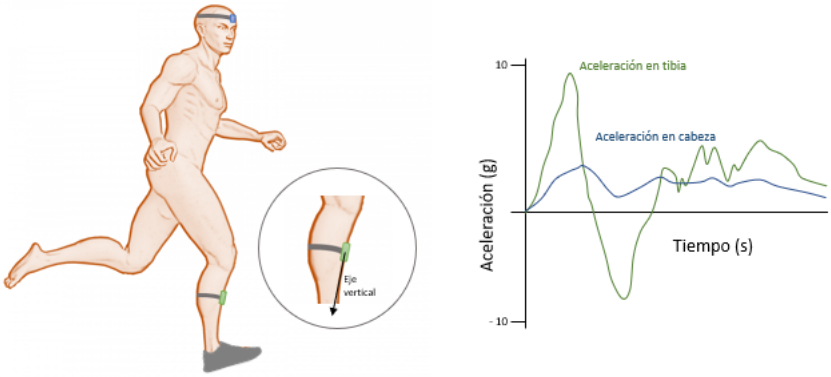
Badanie przyspieszenia występującego w określonych segmentach ciała pozwala nam na ilościowe określenie przenoszenia (uderzenia, tłumienia, itp.) sił reakcji, jak również na badanie funkcji takich jak chód i równowaga, i/lub analizę i identyfikację określonych czynności lub ruchów oraz ich poziomu zapotrzebowania. W zależności od czynności lub celu badania, akcelerometry umieszcza się w obiekcie lub segmencie ciała, który ma być poddany ocenie, poprzez przymocowanie ich do mierzonego obiektu lub w określonych punktach lub regionach anatomicznych, które są kluczowe dla badania danego ruchu lub funkcji.

Istnieją trzy powszechnie stosowane klasy akcelerometrów: piezoelektryczne, piezorezystancyjne i pojemnościowe [4]. Mają one różne właściwości w zależności od planowanego zastosowania i warunków, w jakich muszą pracować. Taka aparatura pomiarowa składa się zazwyczaj z czujnika, który mierzy wartości przyspieszenia drgań odbieranych przez ciało, do którego jest przymocowany i przekształca parametr fizyczny (przyspieszenie) na sygnał elektryczny; kondycjonera sygnału, który filtruje i wzmacnia sygnał z akcelerometru; oraz systemu analizy danych, z kartą akwizycji danych generowanych podczas pomiaru i możliwością ich analizy.

Istnieją akcelerometry, które mierzą przyspieszenie w jednym kierunku (jednoosiowe), w dwóch (dwuosiowe) lub w trzech kierunkach (trójosiowe). Wybór tych czujników zależy od ocenianego ruchu, od osi, z których ma być pozyskiwana informacja. Istnieją również dwa kluczowe parametry przy wyborze odpowiedniego czujnika: zakresy działania przyspieszenia i częstotliwości.

W odniesieniu do przyspieszenia, akcelerometry piezorezystancyjne są stosowane w badaniach chodu człowieka ze względu na ich doskonałe zachowanie w zakresie przyspieszenia użytecznego dla biomechaniki (0 do 100 m/s2) oraz ze względu na możliwość pomiaru niskich częstotliwości, od 0 do 100 Hz. Akcelerometry te mogą być bardzo lekkie (5 g) i zapewniają dużą dokładność. Ich zastosowanie jest również niezbędne do badania efektu

amortyzacji obuwia, ortez lub innych mechanizmów, elementów uzupełniających lub urządzeń (rys.7).



Rysunek 7 – Ocena absorpcji wstrząsów przez obuwie za pomocą 2 akcelerometrów: jeden umieszczony na czole (niebieski), drugi na piszczeli (zielony). Pionowe wartości szczytowe przyspieszenia obserwowane są w obu akcelerometrach w czasie uderzenia i biegu.

W odniesieniu do częstotliwości, przyspieszenia występujących podczas skakania lub biegania nie przekraczają 50 grawitacji (g), dlatego nie jest wskazane stosowanie akcelerometrów o szerokim zakresie, na przykład 500 g. Ponadto dokładność akcelerometru zależy od zakresu częstotliwości. Jednak w razie przypadkowego uderzenia lub potrącenia można osiągnąć do 100 lub 200 g. Z tego powodu w testach zderzeniowych z udziałem manekinów stosuje się akcelerometry o masie do 500 g.

Obecnie tego typu czujniki można znaleźć w połączeniu z innymi, jak z tzw. inercyjną jednostką pomiarową (IMU) lub w urządzeniu GPS (globalny system pozycjonowania), dostarczając istotnych lub uzupełniających informacji w celu uzyskania określonych zmiennych, lub w urządzeniach przenośnych, takich jak telefon lub aktygraf (rejestrator aktywności w ciągu dnia i nocy).

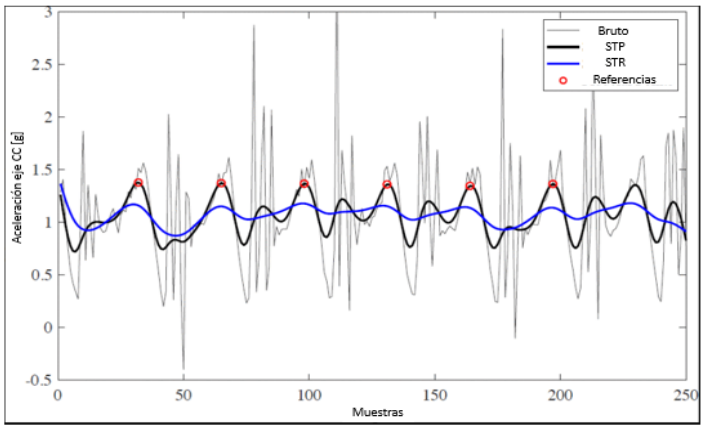
Parametry

Parametry zazwyczaj uzyskiwane z akcelerometru obejmują składnik inercyjny, taki jak przyspieszenie, chociaż przeliczenie na siły jest łatwe przy użyciu wzoru F = m x a, przy czym interpretacja lub analiza wyników jest bardziej intuicyjna; składnik statyczny, taki jak grawitacja; oraz szum, biologiczny lub środowiskowy. Badanie przyspieszenia pozwala na ilościowe określenie częstotliwości i intensywności ruchu ciała lub obiektu w trzech płaszczyznach przestrzeni.

Parametrem często stosowanym przy obliczaniu aktywności fizycznej za pomocą akcelerometru są treningi, lub okresy aktywności. Treningi umożliwiają poznanie ekwiwalentu metabolicznego (MET) na podstawie wielkości przyspieszenia w trzech osiach rejestrowanego w określonym przedziale czasu podczas całego nagrania. Pozwala to na ilościowe określenie rodzaju aktywności w różnych kategoriach, od spoczynkowej do intentensywnej.

Poprzez przetwarzanie sygnału przyspieszenia możliwe jest również uzyskanie przebiegów czasowych, które charakteryzują określony ruch (rys. 8), taki jak chód człowieka. W tym przypadku, maksymalne wartości szczytowe przyspieszenia występują przy uderzeniu pięty o

podłoże. W zależności od oprzyrządowania, czy jest ono stosowane na jednej stopie, czy na obu, czy też na innym segmencie ciała, takim jak tułów, można wyodrębnić parametry takie jak kadencja, czas kroku i kołysania, czas podwójnego podparcia itp..



Rysunek 8 - Przykład danych z różnych charakterystyk kroków chodu uzyskanych przez akcelerometr umieszczony na nodze: Raw (przyspieszenie w osi czaszkowo-udowej), STP (częstotliwość kroku), STR (częstotliwość rozkroku); zaczerpnięte z Gurchiek et al. [5].

Zalety i wady

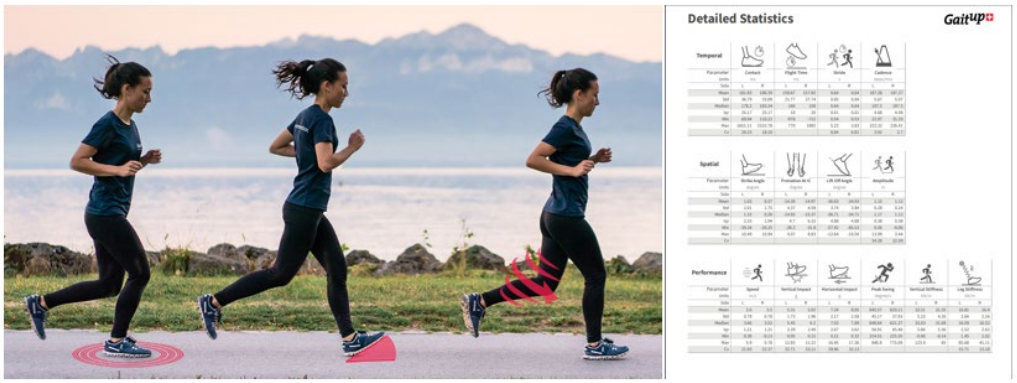
Zdolność tych czujników do ilościowego określania przyspieszenia, wraz z ich niskim zużyciem energii i niewielkimi rozmiarami, pozwala na dynamiczne badanie ruchu; podobnie, ponieważ reagują one również na siłę grawitacji, pochylenia względem pionu mogą być badane statycznie, działając jako inklinometr, w celu analizy, na przykład, postawy ciała.

Niedokładność lokalizacji czujnika, jego umiejscowienie na tkance miękkiej lub związany z tym ruch interfejsu pomiędzy czujnikiem a segmentem/obiektem, warunkują dokładność i niezawodność systemu pomiarowego. Ponadto, jeśli czujnik jest umieszczony zbyt blisko środka obrotu, amplituda rejestrowanego sygnału może być różna [6].

Wymagany stopień dokładności zależy jednak od tego, co jest przedmiotem pomiaru. Na przykład, określenie tłumienia materiału poprzez oprzyrządowanie piszczeli nie wymaga takiej samej precyzji jak identyfikacja i charakterystyka ruchów takich jak chód czy wstawanie z krzesła.

Wiarygodność i prawidłowość pomiarów podlega procesom filtracji sygnału i/lub, w przypadku braku procesów kalibracji lub rekalibracji czujnika, przesunięciu sygnału spowodowanego zmianami temperatury lub ogólnymi fluktuacjami przyrostu mechanicznego lub zużycia [7].

Jak już wcześniej wspomniano, czujniki te wchodzą w skład inercyjnych jednostek pomiarowych (IMU), obok żyroskopów i akcelerometrów. Pozwala to nie tylko na uzyskanie informacji o ruchu, ale również na ocenę sił reakcji, które występują podczas określonych aktywności. Na przykład, na rynku dostępne są urządzenia, które mogą ocenić chód biegacza poprzez połączenie zmiennych kinematycznych i czasowych, jak również tych związanych z siłami uderzenia (rys. 9).



Rysunek 9 - System czujników inercyjnych GaitUp® do analizy chodu biegacza. Czujnik umieszczony jest w okolicy przodostopia biegacza. Zaczerpnięte z https://gaitup.com/running-analysis/physirun-lab/

3. Nacisk

Gdy rejestracja sił reakcji jest niewystarczająca do oceny rozkładu sił na określonej powierzchni ciała w kontakcie z obiektem, konieczne jest opracowanie urządzeń do pomiaru nacisku i dostarczenie informacji o tym, jak rozkłada się nacisk wokół wszystkich punktów kontaktowych [2]. Pomiar oddziaływania pomiędzy tkankami miękkimi ciała a różnymi urządzeniami mechanicznymi jest bardzo przydatny zarówno w badaniach naukowych, jak i w rozwoju zastosowań klinicznych. Przykładem może być badanie rozkładu nacisku na wewnętrznych powierzchniach gniazd protez, ortez lub wkładek korekcyjnych w celu oceny komfortu, korekcji lub ryzyka powikłań wynikających ze szczytowego nacisku, który potencjalnie może powodować owrzodzenia lub pęcherze.

Tradycyjne metody stosowane do analizy nacisku to głównie systemy statyczne, które nie są w stanie określić kształtu i obciążenia powierzchni podczas pracy. Są one zazwyczaj oparte na formach, które odkształcają się pod wpływem obciążenia lub ciężaru, lub na analizie obrazu. Te tradycyjne systemy przeznaczone są głównie do analizy nacisków na podeszwowej stronie stopy. Obejmują one:

- Pedoskop tradycyjny. Jest to urządzenie służące do diagnozowania, wizualizacji i badania odcisków stóp oraz różnych osi stóp. Służy do statycznej akwizycji śladów stóp. Model tradycyjny składa się z przezroczystej kalibrowanej powierzchni, która stanowi podporę dla ocenianego obiektu. Pod tą powierzchnią znajdują się dwa lustra ustawione w stałej pozycji pod kątem 45º w stosunku do powierzchni przezroczystej. Posiada źródło światła skierowane na obszar podparcia na szkle, co zwiększa kontrast z obszarem, który nie ma kontaktu ze szkłem.
- Pedoskop komputerowy. Jest to skaner umieszczony pod szklaną płytą, który precyzyjnie rejestruje kształt stopy w 2D podczas ruchu w jednym kierunku. Oprogramowanie związane z tym systemem zapewnia cyfrową analizę uzyskanych pomiarów linii papilarnych.

W ostatnim czasie opracowano systemy analizy dynamicznej oparte na nowoczesnych czujnikach rezystorowych wykrywających siłę, służące do rejestracji rozkładu nacisku podczas pracy określonego segmentu ciała.

Podstawowymi elementami tych systemów są:

- **Czujnik nacisku**, który mierzy i rejestruje wielkość fizyczną. Jest on zwykle definiowany jako element, który wchodzi w bezpośredni kontakt z wielkością, która ma być oceniana. Czujnik odbiera wielkość fizyczną i przekazuje ją do przetwornika.
- **Przetwornik**, który zwykle jest częścią czujnika. Przetwarza on sygnał wysyłany przez czujnik na inny rodzaj sygnału, zazwyczaj elektryczny, zarówno napięcie jak i prąd, proporcjonalny do nacisku rejestrowanego przez czujnik.
- System zbierania danych z kartą akwizycyjną i dostosowanym oprogramowaniem, które oblicza i prezentuje dane.

Najczęściej stosowanymi czujnikami w tego typu systemach są czujniki pojemnościowe, piezoelektryczne, rezystancyjne i piezorezystancyjne. Charakterystyka każdego z nich determinuje ich zastosowanie w zależności od celu oceny.

Specyfikacje, które należy rozważyć, aby ocenić przydatność czujnika nacisku w odniesieniu do wymagań i ograniczeń ich aplikacji to: **liniowość**, która wyraża liniową zależność między napięciem i prądem; **histereza**, która odnosi się do różnicy między wartościami wyjściowymi

tego samego wejścia, w zależności od ścieżki, po której porusza się czujnik; **stabilność termiczna**, rozumiana jako zachowanie czujnika w obliczu zmian temperatury; **dokładność**; **szybkość odpowiedzi**; **powtarzalność**; **rozmiar** i **zakres** pomiaru nacisku.

Wymagania stawiane czujnikowi nacisku dla konkretnego zastosowania to niska histereza, odpowiednia liniowość wyjścia i zakres ciśnienia. Zalecany zakres nacisku dla analizy chodu wynosi około 1,00 kPa, ale w odniesieniu do sportu zakres nacisku powinien być większy ze względu na charakter ruchów [8].

Oprzyrządowanie przedstawione w niniejszym materiale zostanie sklasyfikowany zgodnie z celem: badanie gołej stopy lub w obuwiu, oraz w odniesieniu do badania innych segmentów ciała. Rozdzielczość przestrzenna, częstotliwość akwizycji, czułość, dokładność i kalibracja są cechami determinowanymi przez przeznaczenie i wpływa na konstrukcję oprzyrządowania.

Platformy nacisku

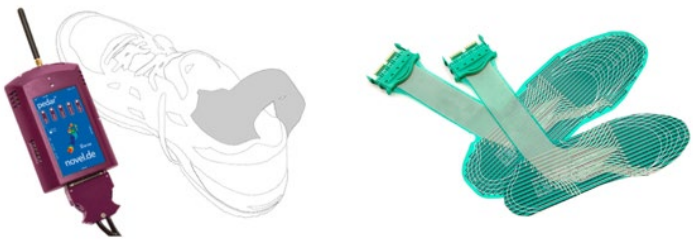
Obiektywne określenie nacisków na podeszwowej stronie stopy oraz ich dokładna lokalizacja na podeszwowej stronie stopy podczas fazy stania w cyklu chodu jest niezbędne w ocenie diagnostycznej i planowaniu leczenia pacjentów z zaburzeniami bolesności lub wrażliwością stopy.

Platformy naciskowe składają się z płaskiej i sztywnej powierzchni, na której czujniki są równomiernie rozmieszczone w formie matrycy w taki sposób, aby mogły rejestrować ciśnienia z taką samą dokładnością na całej powierzchni pomiarowej.

Ten typ platform jest zwykle używany do analizy zachowania się stopy podczas chodu. Aby wykonać to badanie, osoba badana musi przejść boso w linii prostej na odległość co najmniej 9 metrów, wykonując na platformie co najmniej 3 do 5 kroków. Oznacza to, że gromadzenie danych wymaga wielokrotnego, bezbłędnego stawiania kroków na platformie.

Wkładki pomiarowe

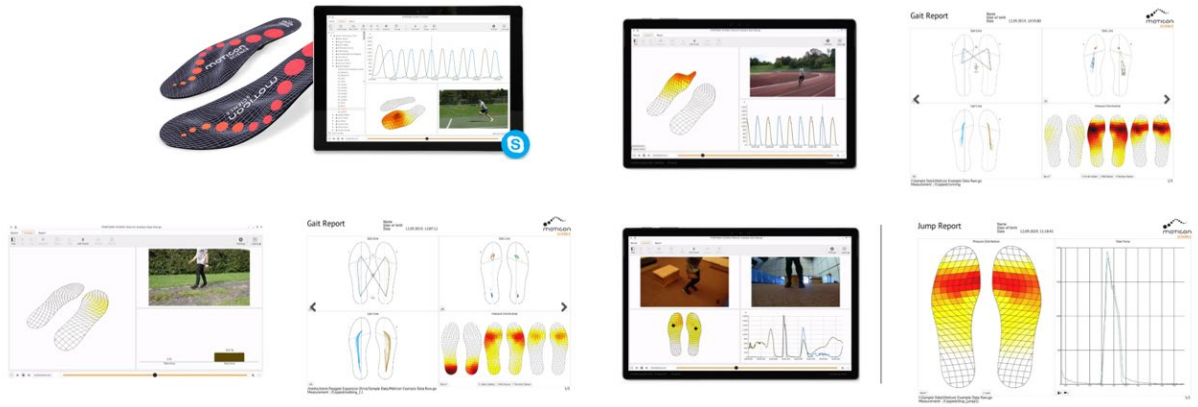
Wkładki pomiarowe składają się z szeregu czujników rozmieszczonych na powierzchni elastycznej wkładki umieszczonej wewnątrz buta w celu pomiaru nacisku na styku stopy i buta (rys. 10).



Rysunek 10 - Przykłady systemów analizy nacisku na stopę przy użyciu wkładki Pedar© firmy Novel https://www.novel.de/products/pedar/ (po lewej) i systemu F-Scan© firmy Tekscan https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system (po prawej).

Wkładki dostarczają ilościowych i klinicznie użytecznych danych do funkcjonalnej oceny chodu, bólu podeszwowego, przepisywania i walidacji ortez kończyn dolnych, zarówno w patologiach mięśniowo-szkieletowych (urazowych lub nie), jak i neurologicznych, lub zapobiegania i monitorowania owrzodzeń w neuropatiach, takich jak neuropatia cukrzycowa.

System ten składa się z czujników wbudowanych we wkładki, które gromadzą dane i przekształcają je w sygnał elektryczny; wzmacniacza sygnału, który kondycjonuje sygnał do odpowiedniego poziomu, tak aby mógł być przejęty przez urządzenie akwizycyjne, które wykonuje obliczenia i prezentuje wyniki. Ze względu na charakter ocenianych ruchów, systemy te przesyłają dane przez Bluetooth/wi-fi lub integrują urządzenia pamięciowe, które rejestrują, zapisują i umożliwiają pobranie danych do analizy.



Rysunek 11- Przykład systemu wkładek Moticon Sensor Foot Dynamics® do analizy nacisku podczas różnych ruchów i uzyskane informacje graficzne: chód (u dołu po lewej), bieg (u góry po prawej) i skok w dal (u dołu po lewej); zaczerpnięte z https://www.moticon.de/apps-overview/#outcomes

Oprzyrządowanie i przenośność tych systemów umożliwiają wykonywanie pomiarów takich jak chód i bieg człowieka w różnych warunkach (rys. 11), często poza środowiskiem laboratoryjnym. Dostarcza to istotnych informacji na temat zachowania materiałów i konstrukcji obuwia, nawierzchni, techniki sportowej, leczenia ortotycznego lub skutków różnych interwencji w przypadku patologii urazowych lub neurologicznych.

Parametry

Typowe parametry związane z analizą nacisku, w tym przypadku związane z podparciem stawu skokowego, obejmują przedstawienie krzywych nacisku każdego czujnika w czasie podparcia; maksymalny nacisk zarejestrowany przez czujnik; średni nacisk zarejestrowany przez czujnik lub zestaw czujników w określonym obszarze, zwykle związanym z regionem anatomicznym, takim jak pięta lub śródstopie; obliczenie położenia środka nacisku (CoP) i jego wychylenia podczas całego podparcia; obliczenie wynikowej siły pionowej, jako wynik integracji informacji z każdego czujnika w czasie; itp., jak również istotne informacje, takie jak kadencja, czas podparcia lub oszacowanie kątów, jak np. kąt postępu chodu itd.

Zalety i wady

Wybierając system, taki jak platforma czy wkładki do wykonywania pomiarów, należy wziąć pod uwagę szereg zalet i wad. Wybrane z nich są wymienione poniżej:

- Liczba czujników, rozumiana również jako rozdzielczość przestrzenna. Jedną z zalet stosowania platformy naciskowej jest duża liczba rozmieszczonych matrycowo czujników, które dostarczają informacji o wszystkich obszarach stopy i ułatwiają obliczanie siły pionowej. Rozdzielczość wkładek jest niższa niż w platformach naciskowych, ale dostarczają one informacji o interakcji stopa-buta, których nie oferuje platforma, a które mogą mieć duże znaczenie kliniczne, np. przy ocenie prawidłowości działania ortezy.
- Materiały, z których wykonane są wkładki, takie jak polimery czy elastomery, możliwość ześlizgnięcia się czujnika oraz warunki cieplne i wilgotnościowe panujące wewnątrz buta mogą zmienić zachowanie czujnika i wpłynąć na powtarzalność pomiarów.
- W celu uzyskania wiarygodnych wyników, konieczne jest zebranie minimalnej liczby kroków w celu przeprowadzenia obliczeń. Problemem związanym z pomiarami na platformie jest "celowanie" w platformę przez ocenianego pacjenta, co oznacza, że pacjent zmienia wzorzec chodu tak, aby jego stopa stykała się z platformą, a co za tym idzie, zmieniane są również uzyskane wyniki.
- Wkładki umożliwiają pomiar chodu i wiele innych ruchów poza kontrolowanym środowiskiem, co pozwala na ocenę osób z takimi zmianami, jak patologie neurologiczne, które uniemożliwiają naturalny ruch i podparcie na platformie.
- Jednym z głównych ograniczeń obu urządzeń i źródłem innowacji w tej technologii jest uzyskanie wiarygodnych pomiarów nacisków stycznych spowodowanych ruchami skrętnymi lub ścinającymi. Ten rodzaj nacisku wywierany jest stycznie do powierzchni, a zatem kierunek jego działania jest równoległy do powierzchni.

Ponieważ obie metody pomiarowe posiadają zarówno zalety jak i wady, wybór idealnego sprzętu pomiarowego powinien być oparty na charakterystyce ruchu, możliwościach funkcjonalnych użytkownika oraz sposobie oceny [9].

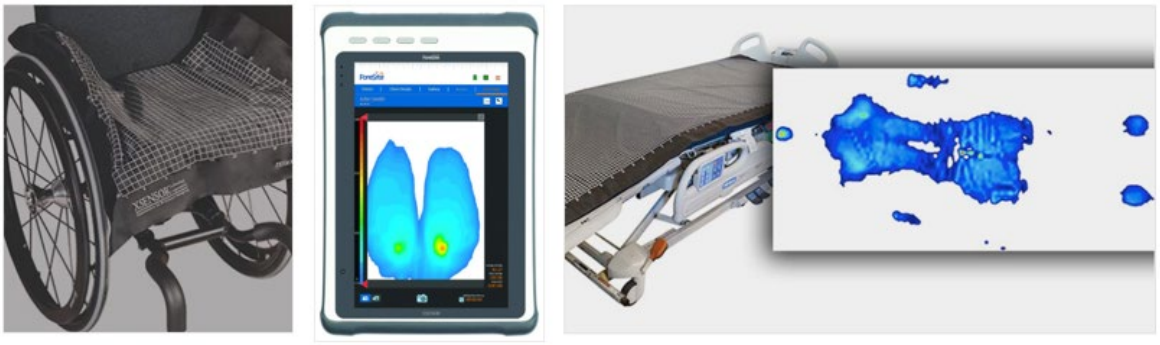
Inne systemy

Poza analizą nacisku stóp, istnieją inne analizy nacisku odnoszące się do innych części ciała. Z tego powodu opracowano sprzęt oparty na tych samych czujnikach nacisku, aby dostosować go do celu badania.

Maty naciskowe

Czujniki nacisku mogą być również wykorzystywane do określenia nacisku wywieranego przez określony segment lub całe ciało na różne powierzchnie. Przy ocenie nacisku przy dużych powierzchniach o różnych profilach lub twardości stosuje się maty naciskowe. Maty naciskowe wykonane są z materiałów tekstylnych, przystosowanych do takich dużych powierzchni, w których czujniki nacisku umieszczone są w matrycy.

Maty te są wykorzystywane na przykład do oceny powierzchni wózków inwalidzkich (rys. 12) w celu oceny szkodliwych nacisków utrzymujących się przez dłuższy czas, które mogą powodować problemy z owrzodzeniem. W związku z tym, są one również szeroko stosowane do analizy powierzchni łóżek (rys. 12) u pacjentów obłożnie chorych, lub do określenia rozkładu nacisku osoby na materac o różnej twardości i konstrukcji w poszukiwaniu higieny postawy i komfortu.



Rysunek 12 - Przykłady mat ciśnieniowych Xsensor© do oceny powierzchni wózków inwalidzkich i łóżek, obrazy zaczerpnięte z https://xsensor.com/applications/wheelchair-seating/ oraz https://xsensor.com/applications/mattress-design-rd/

Rękawiczki naciskowe

W tym przypadku, czujniki wbudowane są w rękawice wykorzystywane do pomiaru rozkładu nacisku w różnych obszarach dłoni podczas różnych czynności życia codziennego, takich jak chwytanie, szczypanie palców (rys. 13) lub podczas używania niektórych narzędzi lub urządzeń (analizy w zakresie ergonomii pracy) (rys. 13).

Rysunek 13 - Przykład systemu analizy nacisku w rękawicy Tactile Glove - Pomiar nacisku na dłoni przez PPS©, zdjęcia zaczerpnięte z https://pressureprofile.com/body-pressure-mapping/tactile-glove

W środowisku sportowym, wiele dyscyplin sportowych wykorzystuje urządzenia lub narzędzia, takie jak rakiety, kije, wiosła, kije golfowe, itp. lub ręce jako element do strzelania, uderzania lub zatrzymywania piłki, jak w siatkówce, piłce ręcznej, itp.

Urządzenia te mogą oceniać nacisk uderzeń, nacisk w każdym regionie anatomicznym i zmianę nacisku dłoniowego lub cyfrowego w czasie. Ten rodzaj analizy ocenia funkcjonalność

podczas czynności wymagających nacisk na kończynę górną i bada wpływ wibracji wywołanych przez sprzęt sportowy [10].

4. Siła mięśniowa

Kiedy konieczne jest ilościowe określenie reakcji mięśnia lub grupy mięśni na bodźce zewnętrzne, stosuje się techniki instrumentalne do rejestrowania wywieranej przez nie siły, takie jak konwencjonalne **dynamometry** i **urządzenia izokinetyczne** lub inne systemy, które określają ilościowo siłę wywieraną podczas określonego ruchu.

Dynamometry

Dynamometr jest statycznym urządzeniem służącym do pomiaru sił lub ważenia obiektów. Tradycyjny dynamometr, wynaleziony przez Isaaca Newtona, opiera swoje działanie na wydłużeniu sprężyny, zgodne z prawem sprężystości Hooke'a, które mówi, że "odkształcenie materiału sprężystego jest wprost proporcjonalne do przyłożonej siły". Zatem znając stałą odkształcenia sprężyny i przemieszczenie oraz stosując to prawo można poznać przyłożoną siłę [11]. Ten typ dynamometru nie pozwala jednak na poznanie zmian siły w czasie.

Istnieją różne rodzaje dynamometrów: hydrauliczne, pneumatyczne, mechaniczne itp., które stały się powszechne w warunkach klinicznych i sportowych. Jest tak w przypadku oceny siły rąk, gdzie zastosowanie tego typu dynamometru jest bardzo rozpowszechnione (rys. 14), ze względu na jego poręczność, łatwość użycia i niski koszt, chociaż jego rozdzielczość i dokładność nie są odpowiednie w niektórych przypadkach i badaniach.

Rysunek 14 - Przykłady dynamometrów (od lewej do prawej): mechaniczny sprężynowy (Saehan Smedley Hand Dynamometer), pneumatyczny (Saehan hand grip dynamometer), hydrauliczny (Baseline® Hydraulic Hand Dynamometers) i cyfrowy hydrauliczny (Jamar Plus+ Digital Hand Dynamometer).

Konstrukcje były zróżnicowane i udoskonalane w zależności od wymagań i segmentów ciała lub grup mięśniowych przeznaczonych do pomiaru. Obecnie stosowane są dynamometry elektroniczne, które zastąpiły sprężyny takimi elementami jak ogniwa obciążnikowe czy mierniki. Wykonują one również pomiary siły i odkształceń, zarówno bezwzględnych, jak i w czasie, nie tylko w pozycji statycznej czy izometrycznej, ale również w ruchu lub w sposób izotoniczny, analizując zarówno koncentryczną, jak i ekscentryczną pracę mięśni.

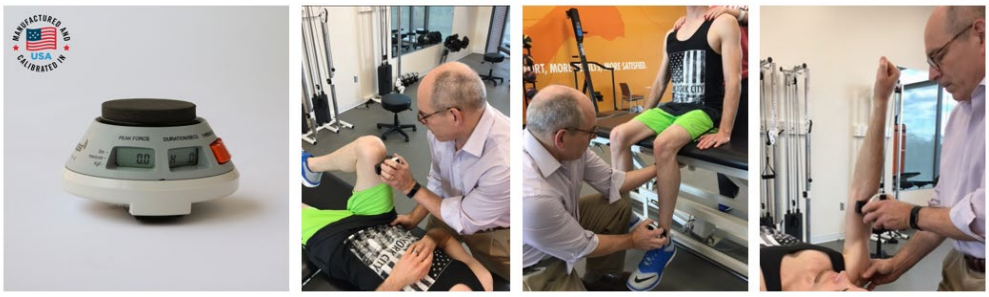
Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie niektórych z tych dynamometrów, sklasyfikowanych w zależności od tego, czy są statyczne czy dynamiczne.

Dynamometry konwencjonalne

Dynamometry te można określić jako urządzenia statyczne, ponieważ mogą one jedynie mierzyć siły lub inne wielkości, takie jak naciski lub momenty, bez ruchu. Umożliwiają one dokonanie pomiaru w ustalonej pozycji ocenianego segmentu ciała, rejestrując wynik skurczu izometrycznego danej grupy mięśni.

Dynamometry ręczne

Dynamometry te nie są zamocowane na stałe i wymagają udziału badającego. W dynamometrii manualnej, badający bierze urządzenie do ręki i przykłada je bezpośrednio do ocenianego segmentu stawu, aby przeciwstawić się sile wywieranej przez daną grupę mięśniową w odpowiednim kierunku (działanie polega na poszukiwaniu pozycji neutralizujących wpływ grawitacji). Bibliografia opisuje różne protokoły dla tego typu oceny mięśni, zarówno dla kończyn górnych, jak i dolnych (rys. 15).



Rysunek 15 - Przykład ręcznego dynamometru cyfrowego: microFET®2 firmy Hoggan Scientific©, obrazy zaczerpnięte z https://hogganscientific.com/product/microfet2-muscle-tester-digital-handheld-dynamometer/

Po odpowiednim umiejscowieniu dynamometru, pacjenci wywierają stopniową siłę na urządzenie przez kilka sekund, aż osiągną swoją maksymalną zdolność mięśniową, podczas gdy egzaminator opiera się tej sile bez poruszania się i bez wywierania siły większej niż ta, którą wytwarza osoba badana w celu uzyskania skurczu izometrycznego (to znaczy bez przemieszczenia stawu).

Walidacja i dokładność tych pomiarów zależy, w większości przypadków, od odtwarzalności protokołu pomiarowego i od zdolności badającego do prawidłowego przeciwstawienia się sile wywieranej przez osobę ocenianą. Aby poprawić ten aspekt, stosuje się również systemy stabilizujące badane segmenty ciała. Pomimo tego, w bibliografii można znaleźć badania, które wskazują, że wyniki uzyskane za pomocą ręcznego urządzenia korelują znacząco z wynikami uzyskanymi za pomocą dynamometru izokinetycznego oraz z wykonywaniem różnych czynności funkcjonalnych, takich jak siadanie do pozycji stojącej (STS), chodzenie i wchodzenie po schodach [12].

Dynamometry siły uchwytu

Główną różnicą pomiędzy tymi dynamometrami a poprzednimi jest ich konstrukcja i przeznaczenie, które polega wyłącznie na ocenie siły chwytu ręki, a w niektórych przypadkach również siły uścisku.

Przyrządy te mogą być używane przez osobę badaną bez pomocy osoby badającej. W niektórych przypadkach, ich konstrukcja pozwala na dostosowanie do różnych miar antropometrycznych ręki i/lub ocenę różnych pozycji chwytu. Jednakże, podobnie jak w przypadku dynamometrów ręcznych, w celu zapewnienia wiarygodności wyników, konieczne jest przestrzeganie ściśle określonych protokołów pozycjonowania oraz instrukcji dostarczonych przez osobę badającą.
Większość z nich mierzy wartości maksymalnej siły chwytu, gdzie występuje tylko jeden stopień swobody i brakuje uniwersalności w ocenie różnych czynności związanych z funkcjonowaniem ręki. Jednakże ocena maksymalnej siły uścisku jest obecnie szeroko stosowanym parametrem, nie tylko w celu określenia możliwości mięśniowych ręki, ale dlatego, że w wielu badaniach jest ona powiązana z różnymi możliwościami klinicznymi, psychologicznymi i fizjologicznymi, szczególnie u osób starszych. Dlatego też, może być łatwo wykorzystana jako wskaźnik w badaniach lub procesach związanych ze starzeniem się, monitorowaniem urazów, rehabilitacją lub procesami terapeutycznymi w różnych dziedzinach.

Niektóre z nich, bazujące na tensometrach i zawierające oprogramowanie do przetwarzania sygnałów, w sposób graficzny pokazują zmiany siły w czasie, co pozwala ocenić np. siłę i stan zmęczenia mięśni (rys. 16).

Rysunek 16 - Przykłady dynamometrów elektronicznych opartych na czujnikach tensometrycznych do pomiaru siły chwytu i siły uścisku, jak również zmęczenia mięśni: (u góry) dynamometry przewodowe i bezprzewodowe firmy Vernier©, obrazy zaczerpnięte ze strony https://www.vernier.com/products/sensors/hand-dynamometers/, (na dole) przykład dynamometru NedVEP/IBV wraz z oprogramowaniem NedMano/IBV, który umożliwia analizę powtórzeń maksymalnej siły chwytu prawej (czerwony) i lewej ręki (niebieski).

Dynamometry izokinetyczne

Są one urządzeniami dynamicznymi, ponieważ mierzą siły lub inne wielkości, takie jak momenty obrotowe, będąc w ruchu i przemieszczając się. Urządzenia te zapewniają pomiar wielkości w zależności od czasu i rodzaju ruchu, ponieważ poruszają się wraz z ciałem, do którego są przymocowane.

Dynamometry izokinetyczne stawiają opór sile mięśniowej wywieranej przez osobę badaną w postaci skrętu (momentu obrotowego) kontrolującego prędkość wykonania ćwiczenia z określoną częstotliwością. W celu utrzymania stałej prędkości wykonania, opór generowany przez urządzenie zmienia się w zależności od siły przyłożonej przez osobę badaną. Na przykład, gdy osoba badana wywiera siłę, która mogłaby wygenerować wyższą prędkość niż wybrana, dynamometr zwiększa opór tak, że działa on jak hamulec, a stabilna prędkość jest utrzymywana. Jeśli siła rozwijana jest mniejsza niż siła niezbędna do utrzymania ruchu z zadaną prędkością, urządzenie zmniejsza opór, aby pomóc w utrzymaniu prędkości. Przyrządy te dostarczają informacji o sile przyłożonej w całym zakresie ruchu [13].

Pierwsze dynamometry izokinetyczne z lat 60-tych XX wieku składały się z konstrukcji zawierającej tłok hydrauliczny, sterowany zawór, ramię dźwigni oraz ogniwo obciążnikowe, które stawiały bierny opór w całym zakresie ruchu stawu. W późniejszym okresie udoskonalono tzw. aktywne dynamometry izokinetyczne, które zawierały większe aktywne źródło zasilania w postaci silnika elektrycznego i komputera. Dodatkowo zawierają one potencjometr zamontowany na osi obrotu, który dostarcza informacji o kącie, a w niektórych przypadkach także osobny tachometr mierzący prędkość kątową [14].

W ten sposób można mierzyć zdolności mięśnia w sposób izometryczny, koncentryczny i ekscentryczny w różnych warunkach, uzyskując informacje o sile i momentach w czasie rzeczywistym zarówno w postaci liczbowej jak i graficznej [15].

Rysunek 17 - Przykłady dynamometrycznych urządzeń izokinetycznych (od lewej do prawej): ocena łokcia i kolana przy użyciu Systemu 4 Pro™ firmy BiodexTM, obrazy zaczerpnięte ze strony https://www.biodex.com/physical-medicine/products/dynamometers/system-4-pro; oraz ocena kręgosłupa szyjnego przy użyciu MCU Multi-Cervical Unit firmy BTE™, obraz zaczerpnięty z https://www.btetechnologies.com/rehabilitation/mcu/

Dynamometry izokinetyczne są wykorzystywane do oceny zarówno stawów kończyn górnych, jak i dolnych oraz kręgosłupa (rys. 17). Jednym z kluczowych stawów badanych z zastosowaniem tej metodyki jest kolano. Powszechnie stosowany test izokinetyczny do oceny maksymalnej wydolności mięśni polega na wykonaniu trzech lub czterech kolejnych skurczów po uprzednim zapoznaniu się z zasadą działania urządzenia i uprzedniej rozgrzewce.

Podczas stosowania tej techniki pomiarowej należy wziąć pod uwagę pewne czynniki związane z uczestnikiem (wiek, płeć itp.), stosowanym sprzętem oraz protokołem pomiarowym. Ocena przy użyciu tego typu dynamometru jest wysoce protokolarna, ponieważ osoba badana musi być odpowiednio ustawiona, a badane stawy muszą być dokładnie dopasowane do osi obrotu dynamometru, aby uzyskać prawidłową ocenę; dlatego też

specjalista przeprowadzający ocenę powinien być przeszkolony w zakresie wykonywania badania i interpretacji wyników.

Ponieważ dynamometry izokinetyczne zmieniają opór i przyjmują największy bodziec przeciążeniowy w całym zakresie ruchu stawu, są stosowane nie tylko jako systemy pomiarowe, ale również jako narzędzia rehabilitacyjne i treningowe do kondycjonowania mięśni.

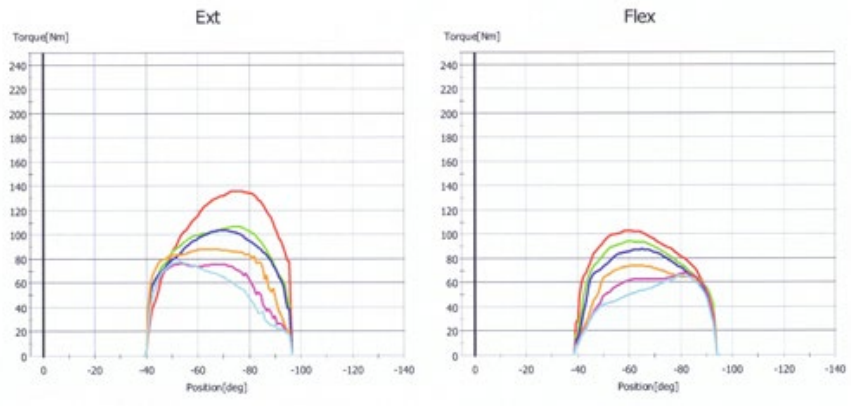
W ostatnich latach, badania związane z zastosowaniem dynamometru izokinetycznego koncentrowały się na kwestiach metodologicznych, takich jak konstrukcja protokołu i odtwarzalność wyników testu, jego zastosowanie w określonych grupach osób i/lub pacjentów, a także jego implementacja w obszarze medyczno-orzeczniczym [15].

Parametry

Parametry, które są zazwyczaj ekstrahowane z użyciem opisanych urządzeń są związane z siłą. Głównym wynikiem dostarczanym przez konwencjonalne urządzenia dynamometryczne jest bezwzględna wartość maksymalnej siły mięśni, zazwyczaj wyrażona w Newtonach. Na podstawie tej wartości można uzyskać **średnią siłę** (średnia z maksymalnej siły mięśniowej wykonanej w różnych powtórzeniach), zmienność pomiarów wykorzystując np. **współczynnik zmienności** (odchylenie standardowe sił maksymalnych w odniesieniu do siły średniej wyrażone w procentach), czy **wskaźnik obniżenia siły** w odniesieniu do ocenianej grupy mięśniowej kończyny kontralateralnej.

Urządzenia izokinetyczne dostarczają informacji na temat wartości bezwzględnej maksymalnej siły mięśniowej (N) wywieranej w każdym punkcie zakresu stawu, **momentu skręcającego lub momentu obrotowego** (Nm) oraz prędkości kątowej (m/s), przy której przeprowadzono badanie. Za standardowy pomiar w testach izokinetycznych uznaje się **maksymalną wartość momentu/siły** na krzywej położenia kątowego w odniesieniu do momentu (MAP) (rys. 18).

Dodatkowo, wyniki oceny izokinetycznej są zwykle wyrażane jako porównanie lub procent. Parametrami, które zazwyczaj się oblicza są porównania **dwustronne** (różnica w sile między kończyną dominującą/ kontralateralną i/lub zdrową/patologiczną), porównania **sekwencyjne** (różnice między dwoma różnymi okresami lub sytuacjami), porównania **krzywych momentu obrotowego**, porównania między **przeciwstawnymi grupami mięśni**, porównania między **pracą koncentryczną i ekscentryczną** oraz porównania siły wywieranej **przy różnych prędkościach**.



Rysunek 18 - Przykład krzywej MAP ruchu wyprostu (po lewej) i zgięcia (po prawej), obraz zaczerpnięty z https://www.isokinetics.net/index.php

Zalety i wady

Zaletami dynamometrów ręcznych są: poręczność, niski koszt i łatwość użycia w porównaniu do dynamometrów izokinetycznych.

Jedną z głównych wad stosowania dynamometrów ręcznych jest wpływ osoby badającej na wiarygodność pomiarów. Dla oceny osłabionych lub kontuzjowanych grup mięśniowych, wyniki, ważność i odtwarzalność są odpowiednie, ale mogą się różnić w zależności od siły badającego, zmienności ustawienia dynamometru prostopadle do kierunku działania siły oraz ocenianej grupy mięśniowej; na przykład wyniki uzyskane dla kończyny dolnej są zwykle mniej powtarzalne niż dla kończyny górnej, gdzie maksymalna generowana siła jest wyższa.

Systemy izokinetyczne mają wiele zalet w porównaniu z konwencjonalnymi ręcznymi systemami dynamometrycznymi, takich jak bezpieczeństwo osoby badanej podczas wykonywania ruchu z oporem akomodacyjnym, ścisłe i dobrze zdefiniowane protokoły, możliwość dostosowania oporu, wybór prędkości wykonania oraz ocena siły mięśniowej poprzez pracę koncentryczną i ekscentryczną, a także izometryczną.

Ponadto, pozwalają nam zobiektywizować krzywe siła/zakres ruchu i porównać różne wartości uzyskane w ramach badania, jak również z tymi z innych badań. Jest to dokładne urządzenie do oceny funkcji mięśni jako całości lub w różnych punktach zakresu stawów.

Interpretacja wyników sił uzyskanych za pomocą aparatury izokinetycznej nie jest jednak pozbawiona trudności; inne wady to wpływ okresów przyspieszania/opóźnienia, wpływ zmienności pomiarów na obliczanie niektórych parametrów, czy brak wystandaryzowanych procedur pomimo intensywnych badań i szeroko zakrojonych wysiłków w celu optymalizacji testów.

W niektórych doniesieniach z badań twierdzi się również, że siła dynamiczna mierzona za pomocą opisanej aparatury ma niewielki związek ze stanem funkcjonalnym pacjenta po zabiegu zachowawczym lub chirurgicznym.

5. Główne obszary zastosowań

Instrumentalne techniki analizy siły umożliwiają poznanie sposobu powstawania ruchu człowieka poprzez analizę różnych zmiennych. Analiza siły dostarcza informacji o tym, dlaczego występuje ruch i uzupełnia opisową analizę ruchu dostarczaną przez informacje kinematyczne. Zmienne badania są określane w procedurach pomiarowych wybranych do scharakteryzowania celu badania.

Opisane w niniejszej jednostce dydaktycznej oprzyrządowane metodologie analizy biomechanicznej są wdrażane w niektórych obszarach życia codziennego, ze względu na ulepszenia tych technologii w zakresie przenośności, wbudowywania w materiały tekstylne i łączności z aplikacjami mobilnymi, jak w przypadku systemów analizy nacisku. Ważne jest jednak, aby prawidłowo określić charakterystykę techniczną sprzętu, procedury użytkowania, niezawodność i ważność w odniesieniu do zastosowań, do których są przeznaczone, aby uniknąć niewłaściwego wykorzystania przez specjalistów, nauczycieli lub użytkowników końcowych.

Najczęstszymi obszarami zastosowań są te związane z aspektami klinicznymi, sportem i ergonomią. Niektóre z najczęstszych przypadków zastosowania w tych obszarach są wymienione poniżej.

Aspekty kliniczne

W dziedzinie klinicznej, główne zastosowania i wykorzystanie tych technik to:

- Charakteryzowanie ruchów prawidłowych i ruchów charakterystycznych dla określonych patologii, zarówno neurologicznych, jak i mięśniowo-szkieletowych, szczególnie w odniesieniu do chodu.
- Obiektywna kwantyfikacja funkcjonalnej zdolności osoby do wykonywania czynności życia codziennego i określenie stopnia jej zmiany.
- Planowanie strategii rehabilitacyjnych, monitorowanie ich postępów i dostosowywanie ich.
- Pomoc w podejmowaniu decyzji o kontynuacji, modyfikacji lub zakończeniu leczenia.
- Pomoc w implantacji i adaptacji ortez i/lub pomocy technicznych.
- Uzyskanie wskaźników efektu zabiegu w celu poprawy efektywności bieżących procesów.
- Ustanowienie wytycznych i monitorowanie za pomocą przenośnych technologii, które poprawiają przestrzeganie i motywację ludzi w określonych procesach związanych ze zdrowiem.

Sport

W dziedzinie sportu, główne zastosowania i wykorzystanie tych technik to:

- Monitorowanie techniki sportowej i poprawa wyników poprzez ilościowe korygowanie błędów i braków w zakresie ruchów technicznych.

- Wspieranie profesjonalistów w ich technikach treningowych poprzez ocenę przyswajania treningu przez sportowca.
- Identyfikacja czynników ryzyka dla specyficznych urazów związanych ze zmiennymi anatomicznymi, technikami oraz cechami fizycznymi i zachowaniami materiałów używanych w praktyce sportowej.
- Unikanie urazów poprzez doradzanie, jak bezpiecznie wykonywać techniki sportowe, w oparciu o informacje dostarczane przez te techniki.
- Monitorowanie postępów określonych zmiennych w procesie rehabilitacji sportowej, co pomaga w powrocie do zdrowia i adaptacji do praktyki sportowej.

Ergonomia

Główne zastosowania technik instrumentalnych w dziedzinie ergonomii w miejscu pracy i projektowania produktów to:

- Ocena/opis ryzyka wystąpienia dolegliwości/urazu mięśniowo-szkieletowego związanego z daną pracą.
- Charakterystyka powtarzających się pozycji i ruchów stawów związanych z konkretną pracą.
- Identyfikacja wzorców zachowań spowodowanych zmęczeniem mięśni i obciążeniem podczas wykonywania zadań związanych z pracą.
- Pomoc w przeprojektowaniu i walidacji stanowisk pracy i produktów.
- Ocena urządzeń i pomocy zewnętrznych w kontekście pracy.
- Rozwój produktu zgodnie z kryteriami ergonomii.

6. Przykłady

Niniejszy rozdział zawiera wybrane przykłady badań i zastosowań różnych techniki instrumentalnych do analizy ruchu zarówno na poziomie profesjonalnym jak i do zastosowań bezpośrednio przez końcowego użytkownika.

W ciągu ostatnich latach obserwować można przyrost prac z zakresu badań **klinicznych** związanych z analizą biomechaniczną, co świadczy o rosnącym zainteresowaniu informacjami wydobywanymi z tych technik. Informacje te znajdują zastosowanie przede wszystkim w obszarach związanych z funkcjonalną oceną możliwości człowieka, charakterystyką różnych patologii, ustalaniem i planowaniem rehabilitacji, itp., głównie w odniesieniu do sił reakcji i nacisków generowanych w chodzie człowieka i w utrzymaniu równowagi, jak również w ocenie różnych przejawów siły mięśniowej.

Rehabilitacja

Wydłużenie średniej długości życia powoduje starzenie się coraz większego odsetka populacji. Populacja ta będzie wymagała intensywniejszej opieki zdrowotnej ze względu na postępującą utratę zdolności funkcjonalnych związaną z ryzykiem zmniejszenia funkcjonalności lub wystąpienia patologii nerwowo-mięśniowych. Ta utrata sprawności funkcjonalnej wiąże się na przykład z ryzykiem upadku, co ma istotne konsekwencje dla jakości życia. Ma to wpływ na system opieki zdrowotnej, ponieważ możliwości w zakresie opieki zdrowotnej mogą zostać znacznie ograniczone.

W tym kontekście poszukuje się rozwiązań, w tym tanich technologii, które stanowią alternatywę dla leczenia szpitalnego i pozwalają na zdalne monitorowanie i kontrolę zdolności funkcjonalnych. Systemy, które rejestrują ruchy i siły, zazwyczaj w środowisku opartym na grach wideo, umożliwiają realizację ćwiczeń szkoleniowych i rehabilitacyjnych oraz monitorowanie postępów. Rosnąca liczba tego typu rozwiązań w warunkach klinicznych stanowi dowód na ich skuteczność. Jednym z tych powodów jest zdolność do tworzenia przyzwyczajeń do leczenia dzięki technologicznemu i rekreacyjnemu komponentowi, jaki zapewniają te urządzenia.

Na przykład, wykorzystanie Nintendo© Wii Balance Board (WBB) jest coraz bardziej rozpowszechnione w środowisku klinicznym ze względu na jego liczne zalety, takie jak cena, przenośność i wydajność, porównywalne z droższym sprzętem, zwłaszcza w rehabilitacji. Większość propozycji wytycznych i treningów rehabilitacyjnych z wykorzystaniem tej platformy przeznaczona jest dla pacjentów z patologiami neurologicznymi (hemiplegia, choroba Parkinsona, Alzheimera, uszkodzenia mózgu itp.) lub przedsionkowymi. W pracy Llorens i wsp. [16] "Balance rehabilitation using custom-made Wii Balance Board exercises: clinical effectiveness and maintenance of gains in an acquired brain injury population" zbadano, czy trening z wykorzystaniem dostosowanych ćwiczeń rehabilitacyjnych z użyciem platformy siłowej (rys. 19) poprawia równowagę w próbie osób z nabytym uszkodzeniem mózgu i czy efekt ten utrzymuje się w przypadku braku podobnego treningu. Jeden z wniosków wskazuje, że wykonywanie ćwiczeń z użyciem tego sprzętu zapewnia trwałe korzystne efekty w badanej próbie w porównaniu z grupą kontrolną stosującą konwencjonalne leczenie.

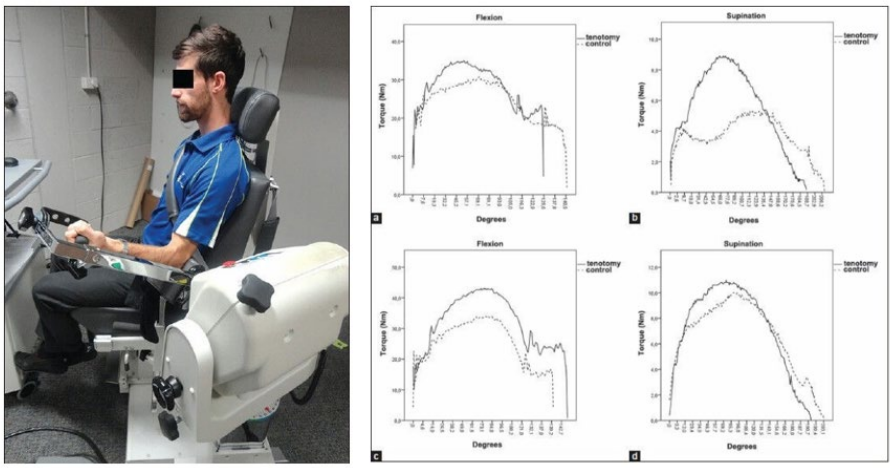
Rysunek 19 - Pacjenci wchodzący w interakcję z prototypem systemu wirtualnej rehabilitacji easy balance (eBaViR), obrazy zaczerpnięte z Llorens et al. [16].

Ocena efektu interwencji

Głównym celem zabiegów chirurgicznych po wystąpieniu urazu układu mięśniowo-szkieletowego jest przywrócenie uszkodzonego stawu do stanu pierwotnego lub doprowadzanie do możliwie największej funkcjonalności. Jedną z głównych zmiennych oceny wyników zastosowanych technik chirurgicznych jest siła mięśniowa. W celu oceny skuteczności interwencji chirurgicznej analiza izometryczna określonej grupy mięśniowej nie dostarcza niezbędnych informacji i konieczna jest ocena siły w całym jej pełnym zakresie stawowym.

W pracy The i wsp. [17] "Long-term functional results and isokinetic strength evaluation after arthroscopic tenotomy of the long head of biceps tendon" oceniono funkcję biomechaniczną ramienia po artroskopowej tenotomii głowy długiej bicepsa (LHB) w obserwacji długoterminowej. Do pomiaru siły zastosowano instrumentalny system Biodex® (Biodex Medical Systems, Shirley, NY, USA). Siła izokinetyczna oceniana była przy prędkości 120º/s w pełnym zakresie zgięcia i supinacji łokcia, zarówno w kontuzjowanej jak i zdrowej ręce. Badanymi zmiennymi, w tym przypadku momentem obrotowym do późniejszej analizy, były średnie wartości szczytowe momentu obrotowego oraz całkowita praca (pole powierzchni pod krzywą po graficznym przedstawieniu wartości momentu obrotowego podczas zakresu stawu) wykonana w pełnym zakresie stawu (rys. 20). Jednym z wniosków płynących z tego badania jest znaczne obniżenie wartości szczytowej siły zarówno w zgięciu łokciowym, jak i supinacji, jednak funkcja kliniczna pozostaje dobra ze względu na fakt, że kompensacje mięśniowe kończyny górnej zachowują moc i pracę wykonywaną w całym zakresie stawów.

Celem tych badań była ocena wyników techniki chirurgicznej w określonych urazach, populacjach i wymaganiach. Pozwala to na zapewnienie prawidłowego zbioru zaleceń lub zaproponowanie modyfikacji, przyczyniających się do postępu w leczeniu.



Rysunek 20 - Ustawienie pacjenta w systemie Biodex® (po lewej) i wyniki krzywych momentu obrotowego zdrowego ramienia (linia przerywana) i rannego ramienia (linia ciągła) dwóch pacjentów dla zgięcia i supinacji (po prawej), obrazy zaczerpnięte z The et al. [17].

Monitorowanie aktywności

Cukrzyca powoduje zmiany na poziomie krążenia i neurologii obwodowej, które wpływają na wrażliwość i zdolności proprioceptywne kończyn dolnych podczas chodu. Jednym z problemów związanych z tą patologią jest rozwój owrzodzeń stóp, który jest jedną z głównych przyczyn hospitalizacji osób z cukrzycą. Jeżeli czynniki takie jak nadmierny wzrost ciśnienia, temperatury i/lub wilgotności nie są kontrolowane, może dojść do poważnych problemów z krążeniem i w rezultacie do poważnych chorób skóry, takich jak owrzodzenia, a nawet amputacje.

Rozwiązania takie jak system Orpyx® SI mogą rejestrować nacisk na stopę i temperaturę dzięki wkładce z czujnikiem. Zapis ten analizuje odciski stóp w życiu codziennym i informuje użytkowników o ewolucji odcisków poprzez aplikację mobilną; ponadto, zbiera dane i wysyła je do pracownika medycznego w celu uniknięcia możliwych komplikacji (rys. 21).

Rysunek 21 - Orpyx® SI, wkładka z czujnikiem, aplikacja mobilna z informacjami graficznymi i zapis dziennej aktywności osoby badanej, obrazy zaczerpnięte z https://www.orpyx.com/.

Zastosowania w dziedzinie **sportu** są bardziej popularne pod względem oddziaływania i zapotrzebowania głównie ze względu na rosnącą liczbę osób uprawiających sport i uczestniczących w różnych dyscyplinach związanych z polityką promocji zdrowia poprzez aktywność fizyczną.

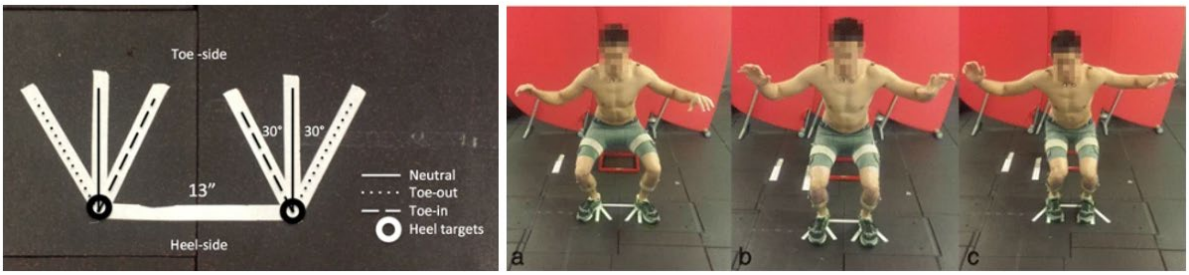
Zastosowanie instrumentalnych technik analizy biomechanicznej pozwala na uzyskanie ilościowych informacji związanych z techniką treningu, doborem materiału treningowego czy monitorowaniem zmiennych związanych z wydolnością i ochroną zdrowia [2]. Główne zastosowania analizy sił reakcji i nacisków koncentrują się na analizie techniki biegu, interakcji z obuwiem lub różnymi materiałami związanymi z amortyzacją i współczynnikami tarcia, zdolności do kontrolowania równowagi, a także na badaniu siły mięśniowej i jej głównych przejawów w sporcie, takich jak maksymalna siła dynamiczna, maksymalna siła eksplozywna itp.

Czynniki ryzyka w zapobieganiu urazom sportowym

Kontuzje wiążą się z okresami braku aktywności sportowej, a w niektórych przypadkach uniemożliwiają nawet powrót do normalnego treningu przy określonym poziomie trudności. Z tego powodu, identyfikacja czynników, które mogą zwiększyć ryzyko wystąpienia kontuzji jest jednym z głównych celów badań w sporcie, zwłaszcza na poziomie profesjonalnym. Istnieje wiele testów klinicznych, radiologicznych i fizjologicznych, które badają różne czynniki przyczyniające się do powstawania urazów. W związku z tym, istnieją również czynniki związane z biomechaniką ruchu sportowego, które pozwalają analizować, przy użyciu technik analizy biomechanicznej, określone zmienne ruchu sportowego związane z występowaniem urazów.

Analiza siły jest jedną z metod wykorzystywanych do osiągnięcia tego celu. Poniżej zamieszczono kilka przykładów ilustrujących potencjał tych systemów analizy siły w badaniach i zapobieganiu urazom sportowym.

Kontuzje więzadła krzyżowego przedniego (ACL) kolana są jednym z najważniejszych problemów odnotowywanych w sporcie. Kontuzja ACL i następująca po niej rehabilitacja trwa długo, a w niektórych przypadkach uniemożliwia powrót do uprawiania sportu na wysokim poziomie i na wymagającym poziomie. Ważne jest, aby poznać mechanizmy, które powodują ten rodzaj urazu, zobiektywizować czynniki niezbędne do powrotu do zdrowia oraz ustalić idealny czas rekonwalescencji. Istnieje wiele wewnętrznych (anatomicznych, fizjologicznych, etc.) i zewnętrznych (obuwie, powierzchnia, etc.) czynników, które wpływają na ryzyko tegi urazu, a niektóre z nich związane są z biomechaniką kończyny dolnej. Jednym z najczęściej badanych aspektów jest wpływ biomechaniki stawów kończyny dolnej na czynności związane z lądowaniem po skoku, jak również jej wpływ na specyficzne czynniki ryzyka kontuzji, takie jak dynamiczna koślawość kolan. Jeden z przykładów opisany jest w pracy Trana i wsp. [18] "The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury", w której badany jest wpływ pozycji stopy na lądowanie podczas skoku (rys. 22). Do rejestracji sił reakcji użyto płyt siłowych Bertec (Bertec Corporation, Columbus, OH, USA) zsynchronizowanych z urządzeniami do optycznej analizy ruchu w celu uzyskania zmiennych badawczych.



Rysunek 22 - Szablon na platformie, który pokazuje trzy pozycje stóp podczas lądowania (po lewej) i przykład odbioru skoku w tych trzech pozycjach: toe-out, neutralnej i toe-in; obrazy zaczerpnięte z Tran et al.[18].

Wyniki tego badania wskazują, że pozycja lądowania z palcami stóp zwiększa liczbę czynników ryzyka związanych z urazem ACL. Zmiana pozycji stopy na podłożu wydaje się znacząco zmieniać biomechanikę kończyn dolnych zarówno u mężczyzn, jak i kobiet podczas skoku na dwóch nogach i może być celem modyfikacji wzorca ruchu [18].

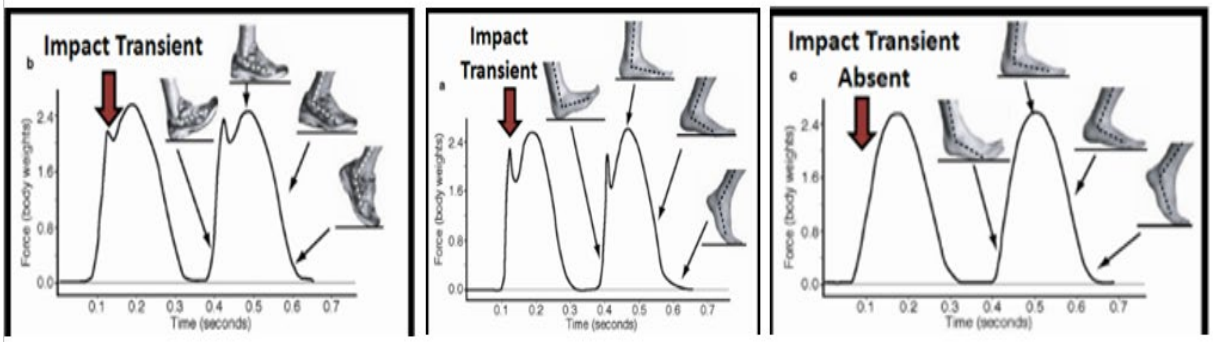
W przypadku biegania, istnieją różne systemy do analizy nacisku na podłoże w celu scharakteryzowania śladu stopy sportowca, a także, jak w poniższym przykładzie, do monitorowania i analizy zmian śladu stopy podczas biegu, oprócz rejestracji różnych zmiennych związanych z treningiem. System SensoriaFitness® składa się ze skarpety wyposażonej w czujniki nacisku w określonych obszarach stopy, które mierzą zmiany zachodzące w podparciu podczas biegu i przekazują informacje w czasie rzeczywistym do aplikacji mobilnej (rys. 23). Dzięki temu użytkownicy mogą zobaczyć informacje o zmianach, które mogą wystąpić w ich treningu i mogą być związane z ewentualnym ryzykiem kontuzji.

Rysunek 23 - System czujników ciśnienia wbudowany w Sensoria© Smart Sock, Sensoria© Core i aplikację Sensoria® Run, obrazy zaczerpnięte z https://www.sensoriafitness.com/

Sportowa ocena techniczna

Bieganie jest jedną z najczęściej uprawianych dyscyplin sportowych na świecie. Coraz więcej osób uprawia bieganie na poziomie amatorskim. Jednym z powodów jest fakt, że do uprawiania biegania wystarczy para butów i wolny czas. Jednakże, podobnie jak w innych dyscyplinach, technika sportowa i materiał, z którego są wykonane, są ważnymi elementami dla osiągnięcia efektywnych wyników i zapobiegania urazom. Wiele prac skupia się na badaniu różnych zmiennych, takich jak siły reakcji stopy, a dokładniej siły reakcji w fazie uderzenia stopy.

Dla tego typu badań, platformy dynamometryczne są wykorzystywane do analizy pionowej siły reakcji uderzenia stopy. Przykładowo, rys. 24 przedstawia różne morfologie siły uderzenia w zależności od rodzaju uderzenia stopy podczas biegu boso lub w obuwiu. Oprócz scharakteryzowania rodzaju techniki biegu (przodostopie, śródstopie i tyłostopie), pozwalają one na zbadanie związku między techniką, efektywnością i ryzykiem urazu, o którym mowa powyżej.



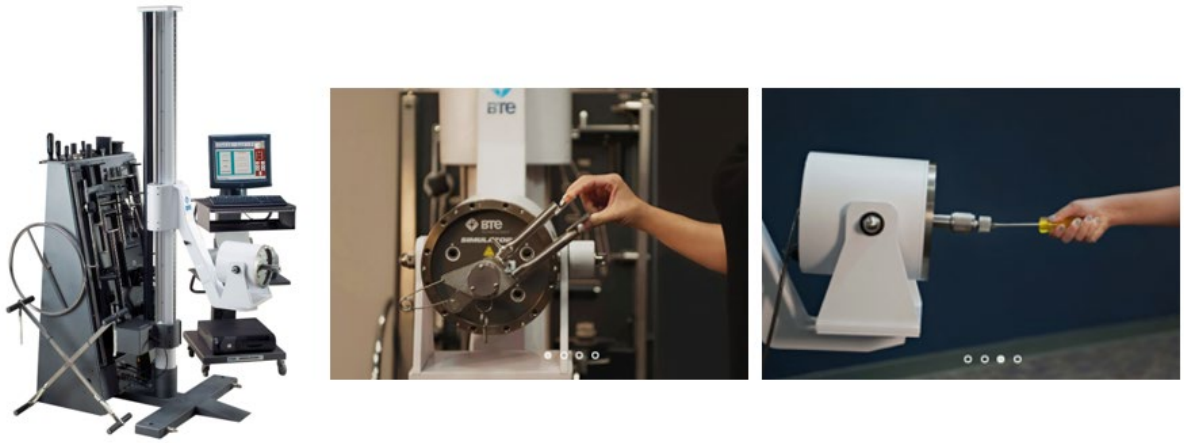
Rysunek 24 - Morfologie sił reakcji pionowej podczas biegu z początkowym uderzeniem w tył stopy w obuwiu (po lewej), boso (pośrodku) i boso z podparciem śródstopia (po prawej) , obrazy zaczerpnięte z http://barefootrunning.fas.harvard.edu/4BiomechanicsofFootStrike.html

W dziedzinie **ergonomii** techniki instrumentalne są stosowane w środowisku pracy do rejestrowania obciążenia i wydolności mięśni podczas wykonywania różnych zadań. Umożliwia to prowadzenie badań, analiz i opracowywanie metodologii w celu właściwego dostosowania środowisk i produktów oraz określenia na przykład ryzyka wystąpienia zaburzeń mięśniowo-szkieletowych. Techniki te pozwalają również na projektowanie i walidację różnych produktów lub środowisk z perspektywy ergonomicznej, tzn. z uwzględnieniem potrzeb i cech danej osoby.

Symulacja stanowisk i zadań roboczych

Istnieją urządzenia, które potrafią ocenić np. siłę mięśni podczas wykonywania określonych zadań podobnych do zadań zawodowych. Dzięki temu możemy poznać możliwości mięśniowe określonych grup mięśniowych danej osoby podczas wykonywania zadań związanych z wymaganiami pracy i badać ich wydajność. Poza tym może to być również wykorzystywane w działaniach rehabilitacyjnych.

Przykładem jest urządzenie BTE© Simulator II® (Ryc. 25). Sprzęt ten może odtwarzać wiele czynności kończyn górnych związanych z pracą lub zadaniami życia codziennego, łącznie z możliwością oceny siły mięśniowej w sposób izometryczny lub koncentryczny izotoniczny oraz generowania protokołów oceny i rehabilitacji.



Rysunek 25 - Symulator BTE© Simulator II® i przykład oceny siły mięśni podczas codziennych czynności (uszczypnięcie) i/lub czynności roboczych (wkręcanie śrub), obrazy zaczerpnięte z https://www.btetechnologies.com/rehabilitation/simulator-ii/

Ocena produktu

Urządzenia te mogą być również wykorzystywane przy projektowaniu lub ocenie produktów zgodnie z kryteriami ergonomicznymi. Ocena ta pozwala na porównanie uzyskanych wyników z kryteriami odniesienia.

Przykładem może być rejestracja nacisku w celu analizy interakcji pomiędzy osobą badaną a produktem. Na przykład, system Tactilus Bodyfitter® firmy Sensor Products Inc. (USA) składa się z maty naciskowej, która analizuje rozkład i wielkość nacisku pomiędzy osobą badaną a powierzchnią do leżenia. Informacje te są rejestrowane i przedstawiane graficznie za pomocą map nacisku (rys. 26).

Rysunek 26 - Przykład analizy rozkładu nacisku między osobą a materacem przy użyciu systemu Tactilus Bodyfitter® i mapy nacisku (po prawej), obrazy zaczerpnięte z https://www.sensorprod.com/dynamic/mattress.php

7. Główne zagadnienia

Kluczowymi zagadnieniami tej jednostki dydaktycznej są:

- Do analizy siły w badaniach biomechanicznych stosuje się różnego rodzaju czujniki o różnych charakterystykach.
- Główne parametry siłowe uzyskiwane za pomocą tych technik związane są z rejestracją sił reakcji w trzech osiach przestrzeni, nacisku, przyspieszeń i siły mięśniowej.
- Czujniki te wchodzą w skład różnych urządzeń w zależności od mierzonego obiektu i ich charakterystyki.
- W celu doboru czujnika do mierzonego obiektu, konieczna jest znajomość charakterystyki technicznej i specyfikacji różnych czujników, jak również ich protokołów pomiarowych.
- Specyficzne techniki instrumentalne analizy biomechanicznej są stosowane w takich dziedzinach jak klinika, sport i ergonomia i mają wiele zastosowań.
- Ciągły rozwój technologiczny, taki jak przenośne systemy rejestracji i połączenie z aplikacjami mobilnymi, pozwoli na rozwój nowych aplikacji do oceny biomechanicznej i rozszerzy jej obszary zastosowania.

8. Bibliografia

[1] Arıtan S. (2014) Biomechanical Measurement Methods to Analyze the Mechanisms of Sport Injuries. In: Doral M., Karlsson J. (eds) Sports Injuries. Springer, Berlin, Heidelberg

[2] Winter, David A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Fourth Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

[3] Dabling, J. G., Filatov A. and Wheeler, J. W. Static and cyclic performance evaluation of sensors for human interface pressure measurement. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego, CA, 2012, pp. 162-165.DOI: 10.1109/EMBC.2012.6345896

[4] Wong, Wai Yin & Wong, M. S. & Lo, Kam. (2007). Clinical Applications of Sensors for Human Posture and Movement Analysis: A Review. Prosthetics and orthotics international. 31. 62-75. DOI: 10.1080/03093640600983949.

[5] Gurchiek, R.D. et al. Remote Gait Analysis Using Wearable Sensors Detects Asymmetric Gait Patterns in Patients Recovering from ACL Reconstruction, 2019 IEEE 16th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), Chicago, IL, USA, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/BSN.2019.8771038.

[6] Pimentel do Rosario, J.L. Biomechanical assessment of human posture: A literature review. Journal of Bodywork and Movement Therapies. Volume 18, Issue 3, July 2014, Pages 368-373. https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2013.11.018.

[7] Kavanagh, J. J., Menz, H.B. Accelerometry: A technique for quantifying movement patterns during walking. Gait & Posture. Volume 28, Issue 1, July 2008, Pages 1-15. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.10.010.

[8] Razak, A.H.A., Zayegh, A., Begg, R.K.,Wahab, Y. Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. Sensors 2012, 12(7), 9884-9912. https://doi.org/10.3390/s120709884.

[9] Orlin, M.N., McPoil, T.G. Plantar Pressure Assessment, Physical Therapy, Volume 80, Issue 4, 1 April 2000, Pages 399–409, https://doi.org/10.1093/ptj/80.4.399.

[10] Gámez, J., Garrido, D., Montaner, C., Alcántara, E. ”Aplicaciones tecnológicas para el análisis de la actividad física para el rendimiento y la salud” en Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, M.Izquierdo, Ed. Buenos Aires, Madrid: Médica Panamericana, 2008, pp. 173 – 197.

[11] Christenson, Jeff. Sensors and Transducers. In: Handbook of Biomechatronics, Jacob Segil, Ed. London : Academic Press, is an imprint of Elsevier 2019, Pages 61-93.

[12] Bohannon, R.W. Considerations and Practical Options for Measuring Muscle Strength: A Narrative Review. BioMed Research International, vol. 2019, Article ID 8194537, 10 pages, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/8194537.

[13] Osterning, L.R. Isokinetic dynamometry: implications for muscle testing and rehabilitation. Exercise and sport sciences reviews, 1986, vol. 14, p. 45-80.

[14] D. Gordon E. Robertson, Graham E. Caldwell, Joseph Hamill, Gary Kamen, Saunders N. Research methods in biomechanics. Second Edition, Ed. Human Kinetics, Inc., 2013.

[15] Dvir, Z. Isokinetic Muscle Testing: Reflections on Future Venues. Hong Kong Physiotherapy Journal, Volume 18, Issue 2, August 2000, Pages 41-46. https://doi.org/10.1016/S1013-7025(00)18002-9

[16] Llorens, Roberto & Albiol, Sergio & Gil-Gomez, Jose-Antonio & Alcañiz Raya, Mariano & Colomer, Carolina & Noé, Enrique. Balance rehabilitation using custom-made Wii Balance Board exercises: Clinical effectiveness and maintenance of gains in an acquired brain injury population. International Journal on Disability and Human Development, 2014;13(3): 327 – 332. doi: 10.1515/ijdhd-2014-0323.

[17] The, B., Brutty, M., Wang, A., Campbell, P. T., Halliday, M. J., & Ackland, T. R. Long-term functional results and isokinetic strength evaluation after arthroscopic tenotomy of the long head of biceps tendon. International journal of shoulder surgery, 2014; 8(3): 76–80. doi:10.4103/0973-6042.140114.

[18] Tran, A.A., Gatewood, C., Harris, A.H.S. et al. The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury. J EXP ORTOP 3, 13 (2016). https://doi.org/10.1186/s40634-016-0049-1.

Wsparcie Komisji Europejskiej dla produkcji tej publikacji nie stanowi poparcia dla treści, które odzwierciedlają jedynie poglądy autorów, a Komisja nie może zostać pociągnięta do odpowiedzialności za jakiekolwiek wykorzystanie informacji w niej zawartych.