

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



MODUŁ:

PODSTAWY BIOMECHANIKI W ZAKRESIE UKŁADU NARZĄDU RUCHU

Jednostka dydaktyczna D: TECHNIKI ANALIZY RUCHU I SIŁ

D.1. Jak można mierzyć ruchy i jakie parametry można analizować? Jakie są główne zastosowania takich pomiarów?



Spis treści

| | |
|---|--------------|
| 1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES | 4 |
| 2. MOVEMENT ANALYSIS SYSTEMS BASED ON IMAGES | 5 |
| Marker-based systems.....6 | |
| Optical equipment of 3D stereophotogrammetry6 | |
| Equipment of 2D movement analysis.....9 | |
| Equipment based on augmented reality (AR) 10 | |
| Marker-less systems 12 | |
| 3. INERTIAL SYSTEMS | 15 |
| Parameters ¡Error! Marcador no definido. | |
| Advantages and disadvantages ¡Error! Marcador no definido. | |
| 4. OTHER | ¡ERRO |
| R! MARCADOR NO DEFINIDO. | |
| Goniometer..... ¡Error! Marcador no definido. | |
| Parameters ¡Error! Marcador no definido. | |
| Advantages and disadvantages ¡Error! Marcador no definido. | |
| Inclinometers20 | |
| Parameters ¡Error! Marcador no definido. | |
| Advantages and disadvantages ¡Error! Marcador no definido. | |
| GPS.....21 | |
| Parameters ¡Error! Marcador no definido. | |
| Advantages and disadvantages ¡Error! Marcador no definido. | |
| 5. MAIN AREAS OF APPLICATION | ¡ERRO |
| R! MARCADOR NO DEFINIDO. | |
| Clinical setting ¡Error! Marcador no definido. | |

| | | |
|---|-------------------------------|-------|
| Sports | 23 | |
| Ergonomics | 24 | |
| 6. EXAMPLES | | ¡ERRO |
| R! MARCADOR NO DEFINIDO. | | |
| Characterisation of pathologies..... | ¡Error! Marcador no definido. | |
| Functional assessment | ¡Error! Marcador no definido. | |
| Selection of sporting equipment..... | 27 | |
| Assessment of sports techniques | ¡Error! Marcador no definido. | |
| Characterisation of working tasks | 30 | |
| Assessment of external aid devices..... | 30 | |
| 7. KEY IDEAS | | 33 |
| 8. REFERENCIAS | | ¡ERRO |
| R! MARCADOR NO DEFINIDO. | | |

1. Wprowadzenie i cele

Należy pamiętać, że kinematyka lub analiza ruchu łączy wiedzę pochodzącą z różnych metodologii w celu uzyskania zmiennych jakościowych i ilościowych oraz opisanie ruchu niezależnie od sił, które go generują.

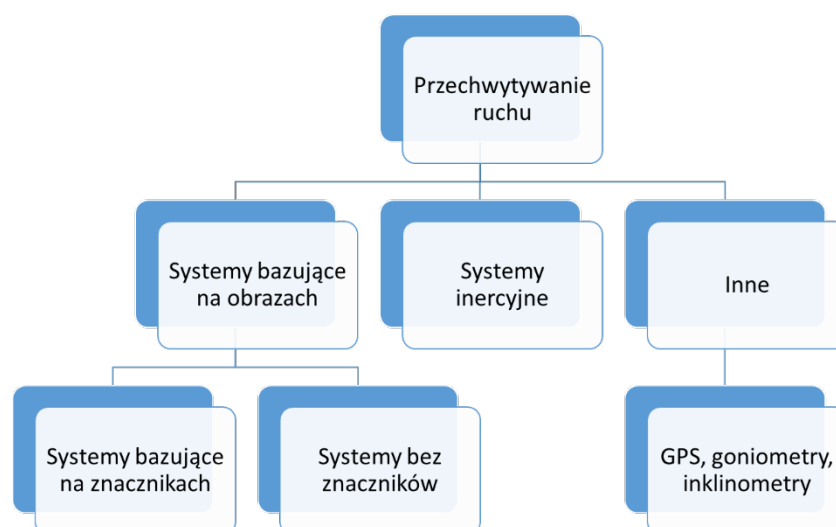
Sprzęt wykorzystywany do badania biomechaniki ruchu człowieka rozwinął się w diametralnym tempie, począwszy od wykonywania ręcznych adnotacji na fotografiach do zaawansowanych systemów optycznego śledzenia ruchu opartych na markerach, systemów opartych na czujnikach inercyjnych oraz systemów analizy bez markerów, które wykorzystują zaawansowane modele, wizję komputerową i złożone algorytmy uczenia maszynowego [1].

Systemy analizy ruchu ewoluowały równolegle z systemami znanymi z takich dziedzin jak animacja wykorzystywana do gier wideo czy kinematografia, rozwijając szybsze i bardziej wydajne narzędzia, dzięki którym kliniczna i sportowa ocena biomechaniczna znacznie wykracza poza ramy tradycyjnego badania laboratoryjnego.

Cele niniejszej jednostki dydaktycznej koncentrują się na następujących zagadnieniach:

- Główne grupy technik analizy ruchu.
- Zrozumienie sposobu ich działania i informacji, jakich dostarczają.
- Ich główne zalety i wady.
- Przedstawienie obszarów, w których wykorzystywane są kinematyczne techniki instrumentalne do analizy ruchu.
- Kilka przykładów zastosowania i systemów opartych na tych technikach instrumentalnych.

Aby ułatwić przestudiowanie materiału dydaktycznego i naukę, uwzględniono ogólną klasyfikację systemów przechwytywania ruchu opartą na rodzaju zastosowanego czujnika lub urządzenia (Rysunek 1).



Rysunek 1 – Klasyfikacja systemów przechwytywania ruchu.

2. Systemy analizy ruchu oparte na obrazach

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami w zakresie analizy ruchu od momentu wprowadzenia jej do oceny biomechanicznej, są metody opierające się na systemach optycznych. Systemy te badają mierzony obiekt za pomocą narzędzi rejestrujących obrazy.

Systemy analizy ruchu oparte na obrazach są obecnie uważane za złoty standard w zakresie biomechanicznego badania ruchów, w tym funkcji i aktywności człowieka. W szczególności systemy optyczne bazują na różnych typach kamer, wyodrębniając niezbędne informacje z sekwencyjnych obrazów lub filmów w celu opisanego występującego ruchu. W zależności od sprzętu, informacje te są wydobywane przy użyciu różnych metod przetwarzania sygnału.

Technologia optyczna służąca do analizy ruchu wykorzystuje specjalnie skonfigurowane kamery i oświetlenie. Dane do śledzenia przemieszczenia się obiektu w czasie można uzyskać poprzez identyfikację punktów lub markerów reprezentujących ten obiekt na kolejnych obrazach.

Estymacja położenia (3D) i orientacji (3D) są głównymi zmiennymi wymaganymi przez system optyczny do określenia 6 stopni swobody (DoF) lub położenia obiektu. Zmienne te, wraz z innymi zmiennymi uzyskanymi z badań kinematycznych, takimi jak prędkość i przyspieszenie, pozwalają na badanie ruchu ciała lub jego segmentów w funkcji czasu, niezależnie lub w interakcji z obiektami i/lub środowiskiem.

Częstotliwość akwizycji i rozdzielczość obrazu w takich systemach optycznych są podstawowymi cechami pozwalającymi na wyodrębnienie zmiennych kinematycznych, które badają przemieszczenie segmentów ciała; wpływają one również na wybór badanych ruchów i precyzję wyników.

Ze względu na złożoność ciała ludzkiego, która wynika z wielości stawów, częściowej sztywności jego segmentów, etc., w badaniach biomechanicznych wykorzystuje się modele kinematyczne, które są mniej lub bardziej złożonymi uproszczeniami stosowanymi do analizy ruchu. Modele badawcze tworzone są poprzez umieszczenie markerów w określonych punktach anatomicznych zgodnie z ustalonym protokołem, który zależy od obszaru anatomicznego lub segmentu ciała lub też od rodzaju ruchu, który ma być analizowany [2].

W 1973 roku powstało Międzynarodowe Towarzystwo Biomechaniki (ang. International Society of Biomechanics ISB), którego celem było promowanie badań w zakresie biomechaniki <https://isbweb.org/>. Od 1990 roku ISB pracuje nad określeniem zaleceń dotyczących standaryzacji w raportowaniu danych dotyczących analizy ruchu. Propozycje w zakresie ww. standardów związane są m.in. z definiowaniem układów współrzędnych globalnych, w stawach i orientacyjnych, jak również opracowywania modeli poszczególnych stawów i segmentów ciała.

Gdy informacja o ruchu występuje w jednej płaszczyźnie (2D), zwykle stosuje się prostsze modele, tj. w oparciu o jedną kamerę (widok monokularny). Gdy ruchy są bardziej złożone i występują w różnych płaszczyznach (3D), wymagany jest bardziej złożony model i w związku z tym zaangażowanie systemu wielokamerowego (multi-view). W systemie tym umieszczone są

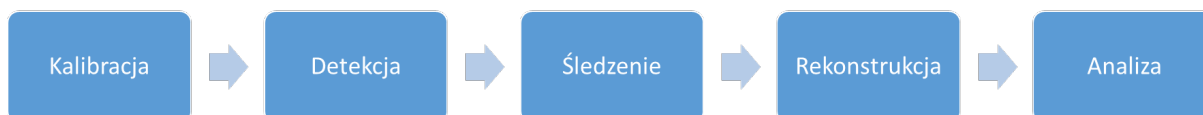
znaczniki i następnie śledzone przez wiele kamer. W celu wykonania poprawnej rekonstrukcji 3D zaleca się, aby co najmniej trzy kamery jednocześnie śledziły i lokalizowały i znacznik.

Rekonstrukcja ruchu 3D za pomocą urządzeń uwzględniających wiele płaszczyzn jest dokładniejsza niż w przypadku, gdy do takiej rekonstrukcji stosuje się informacje pozyskane na podstawie pracy tylko jednej kamery i danych z jednej płaszczyzny (widoku).

Kolejną różnicą pomiędzy wykonaniem analizy 2D i 3D jest generowanie bardziej złożonych procesów kalibracji i rekonstrukcji współrzędnych, a także definicja kątów w stawach [1].

Procesy rekonstrukcji i analizy ruchu z wykorzystaniem systemów optycznych składa się z następujących etapów (rysunek 2):

- Kalibracja. Układ odniesienia, którego geometria i wymiary są znane, jest wykorzystywany do obliczania parametrów korygowania.
- Detekcja (digitalizacja). Identyfikacja punktów, które definiują wybrany model.
- Śledzenie. Śledzenie jest wykonywane przez kamery w trakcie analizowanego ruchu. Podczas całego nagrania definiowane punkty lub znaczniki nie mogą być ukryte przed kamerami.
- Rekonstrukcja. Punkty odniesienia użyte do opracowania modelu biomechanicznego są identyfikowane w zarejestrowanych obrazach, a ich pozycje są uzyskiwane w układzie współrzędnych 3D.
- Analiza. Obróbka wcześniej uzyskanych informacji w celu wyodrębnienia zdefiniowanych zmiennych.



Rysunek 2 – Proces wykorzystywania systemów optycznych.

Systemy przetwarzające informacje z wielu kamer wymagają zazwyczaj kontrolowanego środowiska, zwiększonej mocy obliczeniowej i kosztownej infrastruktury, takiej jak laboratoria analizy ruchu, podczas gdy systemy analizy 2D są bardziej uniwersalne i tańsze. Wybór sprzętu zależy od zmiennych i niezbędnego poziomu szczegółowości badanego ruchu.

Niniejsza jednostka dydaktyczna klasyfikuje urządzenia optyczne do dwóch złożonych grup w zależności od tego, czy wykorzystują one fizyczne znaczniki do identyfikacji punktów odniesienia lub obiektów, umożliwiając opracowanie modelu do rekonstrukcji ruchu w przestrzeni 2D lub 3D.

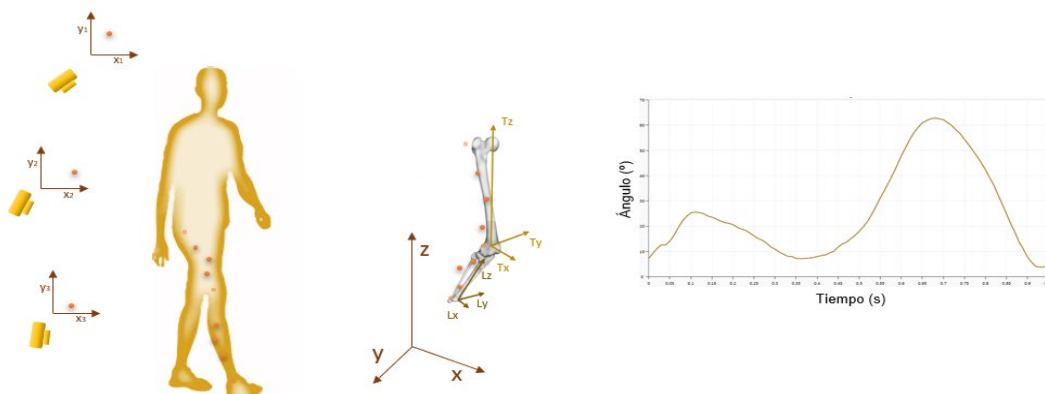
Systemy bazujące na znacznikach

Sprzęt optyczny do stereofotogrametrii 3D

Sprzęt ten składa się zazwyczaj z zestawu kamer, obejmujących przestrzeń z różnych perspektyw, w której występuje ruch, a ponadto z oprogramowania do analizy.

Odpowiednie umieszczenie kamer jest niezbędne do identyfikacji znaczników znajdujących się na obiekcie. Kąt i odległość pomiędzy kamerami, ich położenie względem siebie (paralaksa), względem badanego obiektu itp., a także częstotliwość akwizycji i rozdzielczość kamer, to warunki niezbędne do skutecznej identyfikacji znaczników, i zapobiegania np. ich ukryciu i zagubieniu podczas wykonywanych rejestracji. W ten sposób tworzone są optymalne warunki do wyodrębnienia współrzędnych przestrzennych znaczników, zdefiniowania modelu i wyodrębnienia określonych zmiennych.

Każda kamera zbiera informacje o położeniu znacznika lub znaczników, które znajdują się w jej polu widzenia i ustala ich położenie w lokalnym układzie odniesienia danej kamery. Taki proces jest wystarczający do przeprowadzenia analizy dwuwymiarowej. Jeśli jednak chcemy uzyskać informacje o charakterze trójwymiarowym, informacje pozyskane z każdej kamery muszą być integrowane poprzez techniki stereofotogrametrii. Pozwalają one na zrekonstruowanie współrzędnych znacznika w przestrzeni 3D, ustalając jego pozycję i orientację w globalnym układzie odniesienia. Na podstawie tych informacji można uzyskać takie zmienne, jak kąty pomiędzy segmentami ciała zdefiniowanymi w modelu znaczników (Rysunek 3).



Rysunek 3 – Akwizycja danych kątowych kolana podczas chodu z wykorzystaniem optycznego systemu stereofotogrametrii 3D.

Znaczniki stosowane w systemach stereofotogrametrii mogą być **aktywne**, oparte np. na świetle LED, lub **pasywne**, jak np. kulki (znaczniki) pokryte materiałem odbłaskowym [3], które zwracają odbite światło z powrotem do czujnika kamery. Zaletą znaczników aktywnych w stosunku do pasywnych jest to, że mogą one zapewnić bardziej dokładne pomiary, ale ich wadą jest to, że wymagają stosowania akumulatora i przewodów, co może zakłócać swobodę wykonywania określonych ruchów przez osobę badaną. Ponadto, częstotliwość próbkowania

kamer zmniejsza się, gdy używany jest zestaw wielu znaczników, ponieważ sygnał z każdego znacznika wymaga własnej częstotliwości, aby mógł być indywidualnie zidentyfikowany [4].

W przypadku znaczników odblaskowych, każda kamera posiada ognisko światła podczerwonego (IR), które emituje w swoim polu widzenia. W ten sposób emitowane światło odbija się od znaczników i jest przechwytywane przez czujnik kamery. Czujniki te posiadają filtry, które odrzucają światło naturalne i przechwytyją jedynie promieniowanie podczerwone rozproszone przez markery. W tym przypadku, czujnik kamery wykrywa biały punkt w każdym znaczniku, którego średnica zależy od wielkości znacznika, odległości znacznika od użytkownika, rozdzielczości czujnika, itp. System używa centroidu (punktu środkowego) tego białego punktu do określenia niezbędnych obliczeń i pozycji markera w stosunku do czujnika. Wykorzystywane modele mogą stanowić jeden, kilka segmentów ciała lub całe ciało w zależności od celu analizy.

Systemy te mogą osiągać częstotliwości od 100 Hz lub do 500 klatek na sekundę (fps); jednakże, im wyższa częstotliwość, tym niższa rozdzielczość, co może mieć wpływ na prawidłową identyfikację znaczników i obliczanie zmiennych. Wybór częstotliwości akwizycji zależy m.in. od szybkości ocenianego ruchu. Im szybszy jest ruch, tym więcej zdarzeń występuje w krótszych okresach czasu; z tego powodu, jeśli chcemy zebrać wszystkie informacje, należy zwiększyć częstotliwość przechwytywania. Na przykład, aby przeanalizować ruch swingu golfowego, potrzebna jest częstotliwość 250 Hz, podczas gdy chód człowieka z normalną prędkością może być badany bez pominięcia żadnego elementu ruchu przy częstotliwości 100 Hz..

Na rynku można znaleźć wiele przykładów takich systemów analizy, np. Vicon <https://www.vicon.com/software/nexus/>; BTS Bioengineering <https://www.btsbioengineering.com/products/smart-dx-motion-capture/>; STT Systems <https://www.stt-systems.com/motion-analysis/3d-optical-motion-capture/>; Kinescan/IBV <http://analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/kinescan-ibv.html>, Qualysis <https://www.qualisys.com/software/qualisys-track-manager/>; itp.

Parametry

Parametry uzyskane z obliczeń **pozycji** i **orientacji** segmentów ciała, które są powszechnie stosowane w analizie kinematycznej tych układów to: **kąty względne** między segmentami i **kąty bezwzględne** względem układu odniesienia, ich **prędkości** i **przyspieszenia liniowe** i **kątowe** oraz **odległości** i **długości**. Informacje kinematyczne w połączeniu z informacjami uzyskanymi z analizy sił pozwalają również na wyznaczenie takich parametrów jak **momenty** zewnętrzne i wewnętrzne występujące w stawach.

Zalety i wady

Głównymi zaletami tych systemów jest ich **dokładność** (należy pamiętać, że są one obecnie złotym standardem w analizie ruchu) oraz **elastyczność** w definiowaniu modeli analizujących wiele segmentów i stawów w przestrzeni 3D [5].

Niektóre z ograniczeń tych systemów polegają na tym, że znaczniki mogą zostać **ukryte** lub **zgubione**, ich **wrażliwość na warunki oświetleniowe otoczenia** (np. zmiany oświetlenia naturalnego na zewnątrz), **artefakt** wprowadzany podczas dynamicznych ruchów przez

znaczniki umieszczone na tkance miękkiej, takiej jak skóra, **błędy w umiejscowieniu** znaczników, **czas** potrzebny na przygotowanie oprzyrządowania i nałożenie na obiekt lub **wpływ na wykonanie ruchu** ze względu na ulokowanie znaczników na ciele osoby (np. powodując ograniczenie lub deformowanie trajektorii ruchu).

Jednakże ciągły rozwój tych systemów zmniejsza sukcesywnie problemy związane na przykład z negatywnym wpływem oświetlenia poprzez wprowadzenie ulepszeń w filtrach czujników; lub z wpływem tkanek miękkich poprzez wprowadzenie procedur kalibracji anatomicznej, które umożliwiają również usunięcie niektórych znaczników podczas wykonywania ruchów [1].

Rygorystyczne protokoły w zakresie oprzyrządowania umożliwiają doskonalenie parametrów określających wiarygodność wyników badań wykonywanych np. w różnych dniach lub przez różnych badaczy.

Urządzenia do analizy ruchu w przestrzeni 2D

Systemy analizy ruchu w przestrzeni 2D są powszechnie stosowane, gdy oceniany ruch nie jest złożony, a istotne informacje pojawiają się w płaszczyźnie ruchu, gdy ocena jest przeprowadzana na zewnątrz lub w terenie, gdy ocena nie wymaga wysokiej precyzji w wyodrębnianych zmiennych, itp.

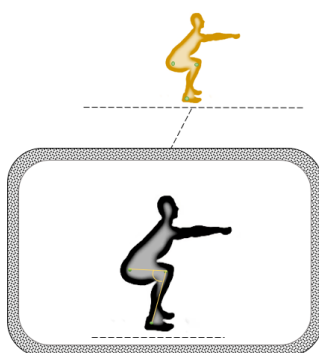
Systemy te składają się z pojedynczej kamery, ustawionej w kierunku przestrzeni pomiarowej, oraz oprogramowania analitycznego.

Aby zapewnić prawidłowe położenie i kąt ustawienia kamery, należy wziąć pod uwagę szereg czynników, takich jak obszar rejestracji, położenie kamery w stosunku do płaszczyzny pomiaru, parametry ogniskowej i apertury przetwornika kamery, prędkość rejestracji itp. Markery umieszczone na osobie muszą być widoczne, podobnie jak w tradycyjnych systemach przechwytywania obrazu w podczerwieni, tak aby system mógł śledzić markery podczas całego nagrania.

Dokładność systemu zależy od kilku czynników, głównie związanych z ustaleniem punktów odniesienia (punktów kontrolnych) w celu kalibracji pomiarów oraz od zniekształceń obiektywów kamer, którym poddawane są przechwytywane obrazy wideo.

Głównym źródłem błędów związanych z obiektywami są zniekształcenia radialne. Zniekształcenie to powoduje dobrze znany efekt rybiego oka, który zmniejsza precyzję, gdy linie odniesienia znajdują się na obrzeżach obrazu. Aby ograniczyć ten problem, proponuje się szereg działań mających na celu poprawę przebiegu pomiarów:

- Linie odniesienia powinny znajdować się w tej samej płaszczyźnie co obraz.
- Płaszczyzna, na której wykonywany jest ruch, powinna być prostopadła do osi kamery (rys. 4).
- Identyfikacja segmentów odniesienia i segmentów do pomiaru powinna znajdować się w pobliżu środka obrazu; podobnie segmenty do pomiaru powinny znajdować się w pobliżu segmentów odniesienia.
- Nie należy regulować powiększenie lub ustawiać widok panoramiczny w celu identyfikacji różnych segmentów



Rysunek 4 – Przykład wskazujący na prostopadłe ustawienia kamery w stosunku do płaszczyzny wykonania ruchu przysiadu, umieszczonej w centrum obrazu.

Zazwyczaj punkty związane z markerami umieszczonymi na osobie są ręcznie identyfikowane na obrazie wyjściowym obrazującym badany ruch. Niektóre systemy mogą śledzić markery automatycznie, ustalając ich pozycję w różnych sekwencjach wideo w celu wyodrębnienia związanych z nimi wartości pomiarowych. Jednakże, sekwencyjne ręczne rozpoznawanie jest również dozwolone w tych przypadkach, gdy nie jest wskazane lub jest niemożliwe umieszczenie markerów na osobie.

Na rynku można znaleźć kilka przykładów takich systemów analizy, jak Kinovea <https://www.kinovea.org/> lub TEMPLO https://www.contemplas.com/motion_analysis_templo.aspx.

Parametry

Główne parametry wynikające z badań i uzyskane z systemów przechwytywania ruchu są szacowane poprzez obliczenie pozycji określonych markerów lub segmentów ciała i obejmują **prędkość** i **przyspieszenie liniowe** i/lub **kątowe**, **odległości**, **przemieszczenia** oraz **względne** i **bezwzględne kąty** ustawienia segmentów lub stawów.

Zalety i wady

Głównymi zaletami tego typu systemów są: ich **dostępność**, ponieważ wymagają jedynie kamery, statywu i komputera z oprogramowaniem do analizy (które w wielu przypadkach jest darmowe); ich **mobilność**, ponieważ oceny mogą być przeprowadzane poza laboratorium; oraz dostarczanie **informacje**, szczególnie w analizie prostych ruchów bez potrzeby uzyskania dużej precyzji, które występują w płaszczyźnie ruchu.

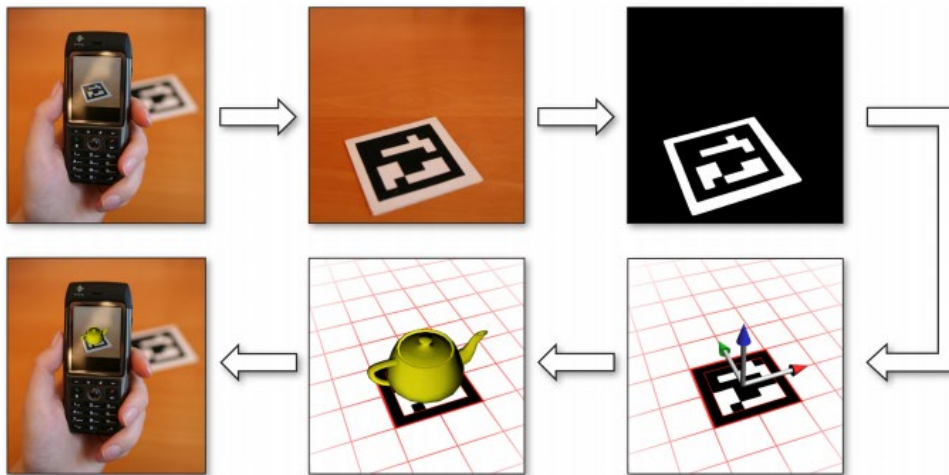
Jeśli chodzi o ich wady, niektóre czynniki wpływają na **wiarygodność** i **precyzję** pomiarów uzyskanych przy użyciu omawianych systemach, które są używane poza kontrolowanym środowiskiem, takie jak wpływ osoby przeprowadzającej badanie na **oprzyrządowanie** i **montaż systemu**, fakt, że rozbięcie ruchu w **płaszczyznach 2D** może prowadzić do błędów w pomiarach kątów, problemy związane z **obiektami**, itp.

Podsumowując, system analizy 3D zapewnia większą precyzję i obszerniejszą specyfikację pomiarów, ale jest droższy i bardziej skomplikowany; natomiast zaletą systemu 2D jest mobilność (np. może służyć do badań terenowych), a także jest niedrogi i łatwy w obsłudze.

Urządzenia wykorzystujące rzeczywistość rozszerzoną (ang. Augmented Reality AR)

Rzeczywistość rozszerzona (AR) jest techniką, która wykorzystuje sztuczną wizję, przetwarzanie obrazu i obliczenia graficzne, aby dodać zawartość cyfrową do świata fizycznego, zapewniając interakcję w czasie rzeczywistym [6], wizualizację i obsługę obiektów rzeczywistych i wirtualnych.

Technika ta rozpoznaje znaki lub cechy obrazu rzeczywistego, które są wykorzystywane jako współrzędne do nakładania lub projekcji obiektów wirtualnych w 2D lub 3D. Aby uzyskać ww. projekcję, AR może wykorzystywać obiekty lub znaczniki jako znaczniki odniesienia lub specyficzne cechy rzeczywistego obrazu. Śledzenie prostokątnych znaczników referencyjnych jest jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań wykorzystanych w zastosowaniach wideo AR [7] (Figure 5).

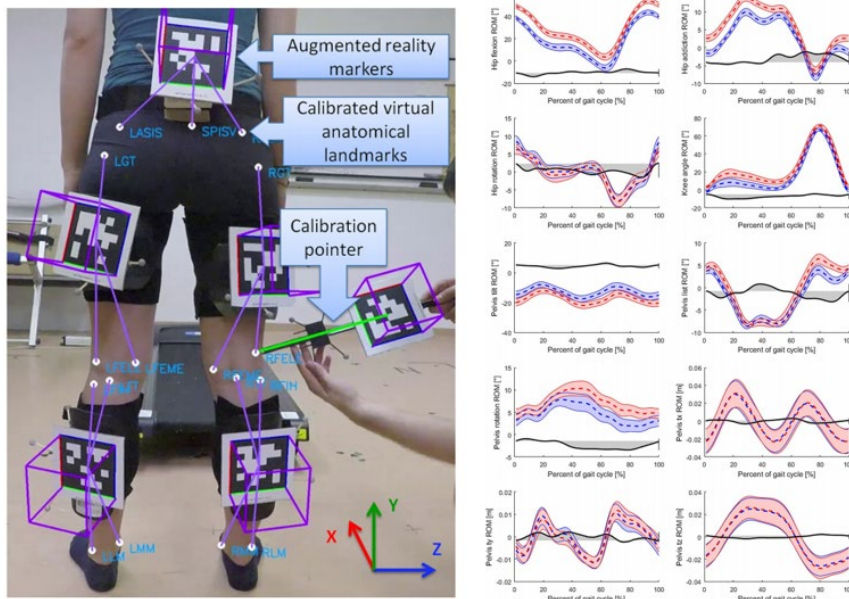


Rysunek 5 – Podstawowy schemat działania aplikacji AR (ARToolKitPlus) do wykrywania i odwzorowania obiektu 3D z wykorzystaniem kamery; obraz z Wagner et al. [7].

Technologia ta opiera się na homografii lub geometrii rzutowej, która określa zgodność między płaskimi figurami geometrycznymi i bada związki między trójwymiarowymi figurami w przestrzeni i ich rzutem na płaszczyznę. Zasada ta jest wykorzystywana przez AR do identyfikacji obrotów i translacji (kinematyki 3D) markera AR względem punktu skupienia kamery oraz względem płaszczyzny obrazu na podstawie sposobu, w jaki narożniki markera pojawiają się w zarejestrowanym obrazie [8]. Główna różnica pomiędzy AR a innymi systemami przetwarzania polega na tym, że w AR obiekty są obracane i przemieszczane we współrzędnych 3D, a nie przy użyciu obrazu 2D.

Prosty system AR składa się zazwyczaj z kamery, jednostki obliczeniowej i ekranu [6]. Jego działanie polega na przechwytywaniu obrazu za pomocą kamery, wykrywaniu markera i wnioskowaniu o położeniu i orientacji kamery w celu projekcji wirtualnego obiektu na obraz rzeczywisty i pokazania wyniku.

Dokładność tych systemów do szacowania położenia i orientacji markerów zależy głównie od kalibracji kamery, która polega na wyeliminowaniu zniekształceń optycznych oraz ustawieniu rozdzielczości obrazu i wielkości markera w pikselach.



Rysunek 6 – Po lewej: zestaw markerów AR użytych do ekstrakcji informacji kinematycznej kończyn dolnych i porównanie trajektorii kątów systemu AR (kolor czerwony) i systemu analizy ruchu Optitrack® (kolor niebieski); po prawej: obrazy z Nagymáté et al. [8].

Urządzenia te są wykorzystywane głównie w procesach rehabilitacji, ze względu na możliwość interakcji z użytkownikiem, lub jako systemy przechwytywania ruchu. W pracy Nagymáté et al. [8] zaproponowano i zwalidowano niedrogi system analizy chodu w porównaniu z tradycyjnymi systemami fotogrametrii 3D, oparty na pojedynczej kamerze i zestawie markerów rzeczywistości rozszerzonej (AR). Markery AR są umieszczane na segmentach, które mają być mierzone (rysunek 6), zapewniając, że są one widoczne dla kamery przez cały czas rejestrowania ruchu, w tym przypadku cyklu chodu. Wyniki pomiarów parametrów przestrzenno-czasowych i kątowych chodu porównano z wynikami uzyskanymi przy użyciu optycznego systemu trójwymiarowej analizy ruchu.

Parametry

Główne parametry są wyodrębniane po uzyskaniu pozycji i orientacji badanego segmentu poprzez markery AR, tak jak w przypadku systemów optycznych, tj. za pomocą modelu markera definiującego segment. Parametry te obejmują parametry przestrzenno-czasowe, zakres ruchu stawów, prędkość, przyspieszenie, itp.

Zalety i wady

Technologia ta umożliwia interakcję z różnymi środowiskami lub obiektami w czasie rzeczywistym, a także rejestrację zmiennych kinematycznych związanych z daną czynnością, co ułatwia realizację celów lub zadań związanych z procesami szkolenia lub rehabilitacji.

Śledzenie oparte na markerach AR może być realizowane za pomocą pojedynczej kamery, chociaż przechwytywanie ruchu może być ograniczone do jednego kierunku lub przestrzeni, tak aby rozdzielczość sprzętu mogła prawidłowo przetwarzać obraz.

Systemy bez znaczników

Obecne osiągnięcia w zakresie oceny ruchu koncentrują się na rozwoju w pełni zautomatyzowanych systemów, które nie wykorzystują markerów przymocowanych do ciała. Komputerowe przetwarzanie obrazu w tych systemach rekonstruuje ruch z wideo lub czujnika optycznego, dzięki czemu osoba badana nie musi nosić żadnego rodzaju znacznika śledzącego [3]. Usprawni to badania i działania podejmowane w obszarze opieki zdrowotnej w różnych dziedzinach, takich jak badania kliniczne i medycyna sportowa.

Najnowsze systemy wykorzystują kamery stereograficzne, które imitują ludzkie widzenie obuoczne, lub kamery aktywne, które rzucają światło na scenę w celu wygenerowania mapy głębi. Systemy te zwiększają efektywność pozyskiwania danych w porównaniu do poprzednich metod, które wykorzystywały zestaw zsynchronizowanych i skalibrowanych kamer, jak również środowisko chromatyczne.



Rysunek 7. Obraz mapy głębi przy użyciu the OpenNI tool, z Dyce et al. [9].

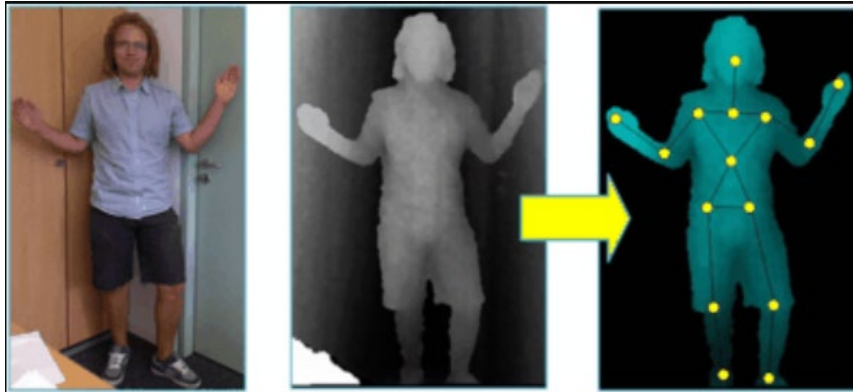
Mapa głębi (Rysunek 7) to obraz, w którym piksele opisują odległość od punktu w przestrzeni do kamery, zamiast zwykłych informacji o kolorze czy poziomie jasności. Informacja o głębi może pomóc zredukować problemy tradycyjnych kamer: warunki oświetleniowe otoczenia, cienie, odbicia czy nierówne tła [1].

W tych urządzeniach stosowanych do przechwytywania ruchu najważniejsze jest rozpoznanie sylwetek lub struktur, które muszą być zlokalizowane i śledzone podczas analizy. Systemy te dopasowują modele ciała ludzkiego do zlokalizowanych sylwetek i wydobywają informacje o badanych segmentach. Następnie informacje te są przetwarzane z wykorzystaniem procesów rekonstrukcyjnych opartych na modelu dopasowanym do sylwetki i pozycji obiektu pozyskanej z obrazu (algorytmy generatywne), lub procesów określających, poprzez automatyczne uczenie i trening systemu analizy, pozycję modelu z wykorzystaniem jedynie obrazu (podejście dyskretne).

Typowymi elementami składowymi bezznacznikowych systemów motion capture są [1]: system kamer, model ciała, rozpoznawanie sylwetki ciała lub obiektu oraz algorytmy wykorzystywane do ekstrakcji parametrów sylwetki, postawy i położenia modelu ciała.

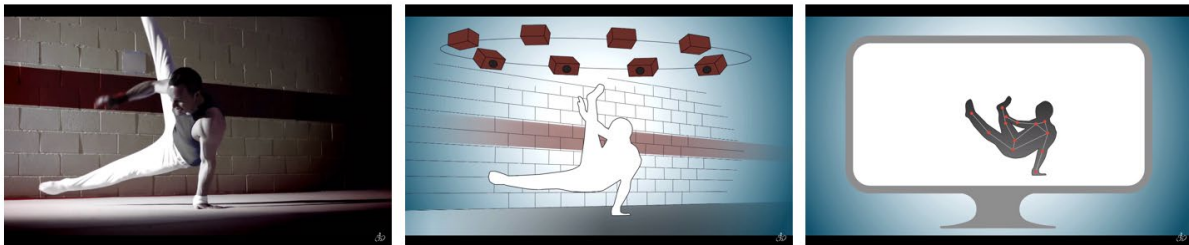
Jednym z najszerzej stosowanych systemów do rozrywki, który znajduje coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach, np. w rehabilitacji, jest kamera Kinect® firmy Microsoft. Kamera ta generuje mapę głębi poprzez emisję światła podczerwonego na ciało. Następnie

Kinect® śledzi model dopasowany na obrazie poprzez połączenie informacji o głębi i kinematyce ludzkiego ciała (rys. 8).



Rysunek 8. Obrazy mapy głębi Microsoft Kinect i generowania modelu, obraz z Kristkler et al. [10].

Ponadto, istnieją bardziej złożone systemy analizy ruchu bez markerów, które są specjalnie stosowane do ruchów sportowych. Składają się one z kilku kamer, które otaczają obszar analizy oraz oprogramowania do rozpoznawania ciała, z którym kojarzony jest model ciała w celu obliczenia zmiennych kinematycznych w przestrzeni 3D (Rysunek 9). Systemy te mogą wykonywać pomiary zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i na zewnątrz, o ile pozwalają na to warunki oświetleniowe i kontrast kolorystyczny między tłem a obiektem; wpływa to jednak na ich precyzję i niektóre płaszczyzny ruchu.



Rysunek 9 - Ruch sportowy w czasie rzeczywistym, rozpoznawanie sylwetki i przyporządkowanie modelu ciała, obrazy z Simi Shape 3D® (<http://www.simi.com/>).

Obecnie dostępne są systemy oparte na pojedynczej kamerze do pozyskiwania informacji 3D. Po procesach dopasowania płaszczyzny ruchu i kalibracji, śledzą one punkty ciała, które tworzą predefiniowany model poprzez metody sztucznej inteligencji składające się z sieci neuronowych, które są wyuczone w identyfikacji i przewidywaniu położenia tych punktów, a także uczące się wzorców ruchu na podstawie otrzymanych danych. Dokładność [11] w zakresie zmiennych ruchu uzyskana w niektórych badaniach jest wystarczająca do zastosowania ich w takich dziedzinach jak rehabilitacja i trening sportowy.

Parametry

Najczęstsze parametry pozyskiwane za pomocą tych systemów są analogiczne do tych opisanych dla systemów opartych na markerach.

Zalety i wady

Jedną z głównych zalet tych systemów jest możliwość przeprowadzania analiz ruchu w rzeczywistym środowisku, co oszczędza czas potrzebny na przygotowanie pomiarów w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem systemu markerów.

Rozdzielczość kamer używanych w tych systemach wynosi zazwyczaj 640x480 pikseli, co może być wystarczające w kontekście gier wideo, ale może stanowić problem, gdy są one używane do rozpoznawania konkretnych segmentów ciała. Ponadto, częstotliwość pomiaru, która wynosi około 30 Hz, ogranicza ich zastosowanie do ruchów, które nie są wykonywane z dużą prędkością.

Jeśli chodzi o dokładność tych systemów, badania opisane w literaturze przedmiotu odnoszą się głównie do powolnych ruchów, takich jak chód człowieka, podczas gdy szybsze ruchy, takie jak te wykonywane w sporcie, wymagają dalszych badań. Należy też zauważyć, że dokładność i wiarygodność wyników uzyskanych w badaniu ruchów rotacyjnych w płaszczyźnie poprzecznej są trudniejsze [1].

3. Systemy inercyjne

Systemy inercyjne to rodzaj systemów nieoptycznych opartych na inercyjnych jednostkach pomiarowych (IMU). W analizie ruchu jednostki te składają się zwykle z kilku czujników (rys. 10):

- **Akcelerometr.** Mierzy siły przyspieszenia, zarówno statyczne (takie jak grawitacja), jak i dynamiczne (generowane przez ruch, wstrząsy, itp.). Akcelerometry stosowane w tych systemach są zazwyczaj trójosiowe, to znaczy, że mierzą **przyspieszenie liniowe**, które występuje w każdej z trzech osi przestrzeni. W ruchach statycznych (gdy osoba badana nie porusza się), mierzą one obroty kątowe.
- **Żyroskop.** Mierzy **prędkość kątową**, czyli prędkość obrotu czujnika, w trzech osiach przestrzeni.
- **Magnetometr.** Pozwala poznać orientację czujnika względem północnego bieguna magnetycznego, a także oszacować położenie czujnika wraz z informacjami z poprzednich czujników.



Rysunek 10 - Obraz czujników wchodzących w skład jednostki IMU, ich rozmiar, a następnie umieszczonych w obudowie w celach komercyjnych, z Xsens ©

Podstawowe wymagania do wyznaczenia kinematyki w 2D i 3D przy użyciu tej technologii to [12]:

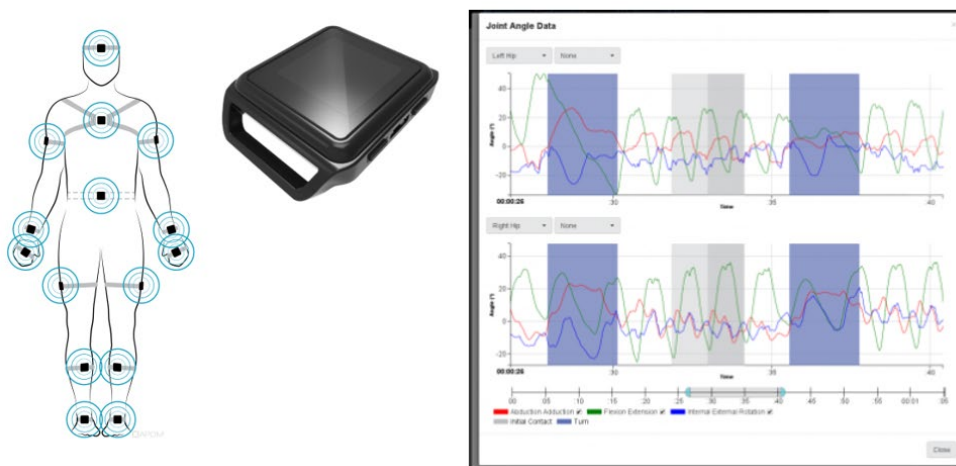
- Znajomość **orientacji i położenia czujnika** w przestrzeni 2D i 3D. W warunkach izolacji nie można określić położenia w układzie globalnym, a jedynie jego orientację przestrzenną. Z tego powodu informację tę uzyskuje się za pomocą algorytmów łączenia informacji pochodzących z czujników.
- Określenie **osi**, w których występuje ruch. Osie sensorów muszą być **dopasowane** do osi ruchu anatomicznego układu odniesienia, aby ułatwić funkcjonalne zrozumienie kinematyki stawów w przestrzeni 2D i 3D.

Procedury **kalibracji i estymacji** zdarzeń, w których używane jest zero do korekcji błędów dryftu czujnika, stosowane są do rozwiązywania błędów estymacji położenia w wyniku obliczeń mających na celu integrację sygnałów z czujników i zestrojenie osi. Procesy te są zazwyczaj wykonywane ad hoc dla analizowanego ruchu.

Czujniki inercyjne oferują precyzyjną i niezawodną metodę pomiarową do oceny ruchu człowieka, ale ich precyzja i niezawodność w szacowaniu niezbędnych informacji jest różna i

zależy od ocenianego ruchu ze względu na potrzebę przeprowadzenia specyficznych obliczeń. Ostatecznie doskonalenie procesów obliczeniowych sprawia, że są one ważnym systemem do badania ruchów ludzkich. [5].

Różne komercyjne systemy dostępne na rynku są dostarczane w małych i lekkich pudełkach z bezprzewodową transmisją danych. Czujniki są one dołączane do segmentu ciała w celu oszacowania ruchu danego segmentu w przestrzeni [13]. Dodatkowo można zastosować dwa lub więcej IMU, które odbierają dane z kilku segmentów jednocześnie i są zsynchronizowane, co generuje model ciała w celu oszacowania kinematyki stawów (rys. 11).



Rysunek 11 - Przykład modelu zawierającego czujniki inercyjne Opal® i wyniki pomiarów kątów stawów z zastosowaniem oprogramowania Moveo Explorer®, obrazy z <https://www.apdm.com/kinematics/>

There is a lot of literature about the use and usefulness of these systems; however, the identification of new solutions to increase their precision and reliability, as well as their applications, is still an open field with great expectations.

Parametry

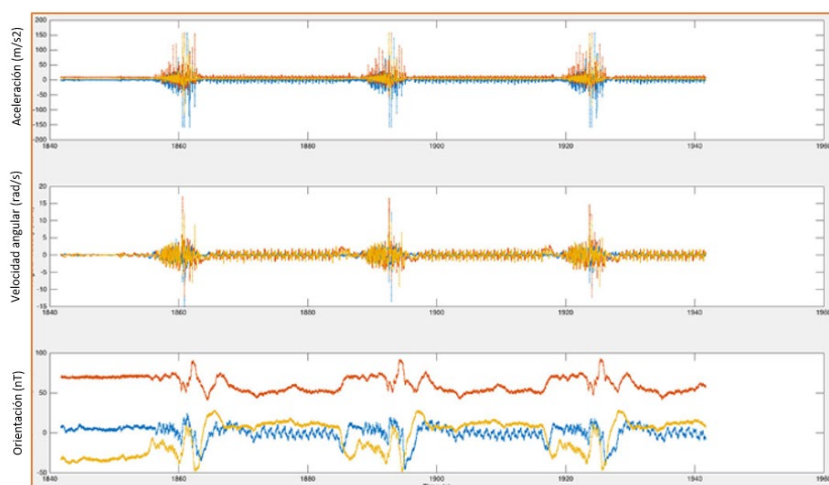
Najczęściej stosowanymi parametrami obliczonymi za pomocą systemu pomiarowego opartego na inercyjnych jednostkach ruchu są **przyspieszenia liniowe** w trzech osiach przestrzeni, **prędkości kątowe** w trzech osiach przestrzeni, **orientacja przestrzenna** (rys. 12), **kąty względne** pomiędzy dwoma segmentami w trzech płaszczyznach przestrzeni oraz **zdarzenia przestrzenno-czasowe**, w zależności od analizowanego ruchu.

Zalety i wady

Jedną z głównych zalet tych systemów jest możliwość wykonywania dynamicznych analiz 3D ruchu człowieka bez ograniczeń i trudności jakie występują przy systemami optycznych. Takie cechy jak **mobilność**, możliwość wykorzystania poza środowiskiem laboratoryjnym, **wielofunkcyjność** zastosowania oraz cena, czynią je atrakcyjną alternatywą dla systemów tradycyjnych.

Do wad należy zaliczyć podatność na **błędy pomiarowe** w obliczaniu **pozycji bezwzględnej** wynikające z obecności metali w środowisku pomiarowym, charakteru czujnika oraz wrażliwości algorytmów łączenia danych wpływając na uzyskiwanie pozycji poprzez całkowanie przyspieszenia liniowego, które wpływa na parametry odległości i długości. W tej dziedzinie odnotowuje się jednak duże postępy przyczyniające się do minimalizowania tych błędów.

Inną wadą stosowania systemów inercyjnych jest **oprzyrządowanie**, które ogranicza zdolność badania małych stawów lub segmentów ciała.



Rysunek 12 - Wizualizacja sygnałów prędkości kątowej, przyspieszenia i parametrów orientacji pochodzących z czujnika inercyjnego; obraz z imeasureu.com

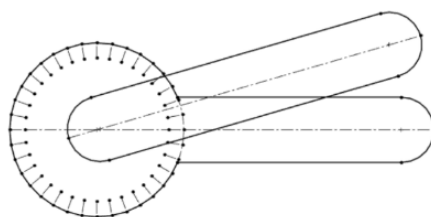
4. Inne

W tej części opisano inne systemy do analizy ruchu, wykorzystujące inne technologie niż opisane powyżej, które są stosowane w różnych obszarach oceny biomechanicznej.

Goniometr

Goniometry są urządzeniami pasywnymi powszechnie stosowanymi w warunkach klinicznych do pomiaru kątów stawów, co jest przydatne do obiektywizacji deficytów ruchowych w ramach badania klinicznego.

Przyrząd ten (rys. 13) jest podobny do kątomierza, ale został zaprojektowany specjalnie na potrzeby pomiaru kątów stawów ludzkiego ciała. Istnieją różne rozmiary i kształty goniometrów w zależności od ocenianego stawu. Pomiaru dokonuje się ustawiając oś goniometru w jednej linii z osią mierzonego stawu, a każde ramię goniometru z segmentami tworzącymi staw, następnie wskazuje się zmierzony kąt. [14].



Rysunek 13 – Rysunek goniometru służącego do pomiaru kątów stawów, obraz z Christenson, J. [3].

Od czasu wprowadzenia tego instrumentu opracowano różne metodologie opisujące sposób wykonywania pomiarów i poprawiające ich wiarygodność, ponieważ wiarygodność ta zależy od doświadczenia osoby dokonującej pomiaru w prawidłowym ustawieniu goniometru, stawu i osoby poddanej pomiarom. W literaturze można znaleźć wiele publikacji na temat wiarygodności pomiarów wykonywanych przez różne osoby lub tego samego człowieka w różnych sesjach pomiarowych.

Jedną z najczęściej stosowanych metodologii jest instruktaż zaproponowany przez American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS). Od początku jego powstania, tj. od w lat 60-tych do ostatniej wersji z 1994 roku, instruktaż opiera się na ilustracjach pokazujących, jak należy wykonywać pomiary z określonej "pozycji zerowej". Nie określa jednak konkretnych obszarów anatomicznych służących do ustawienia ramion goniometru, a podanym wartościom normatywnym nie towarzyszą dane na temat ich wiarygodności. W niektórych przypadkach są one oparte na małych próbkach z udziałem osób dorosłych [15].

Różne grupy badawcze pracowały i nadal pracują nad udoskonaleniem metodologii wykorzystujących ten instrument, dostarczając zaleceń dla określonego stawu w oparciu o badania wiarygodności, jak również wartości normatywne z podziałem na wiek i płeć.

Parametry

Parametrem dostarczanym przez goniometr jest pomiar wartości względnej kąta stawowego między dwoma segmentami, bez podawania bezwzględnej pozycji segmentu lub stawu w przestrzeni.

Zalety i Wady

Główną zaletą tego instrumentu jest to, że jest niedrogi, **łatwy w użyciu** i **zwalidowany**, ponieważ dostarcza informacji na temat kąta stawu, co jest istotne na przykład w badaniu klinicznym.

Jedną z głównych wad goniometrów, która jest akceptowana w większości zastosowań, jest ich wiarygodność.

Aby uzyskać ciągły zapis pomiaru ruchu, można zastosować **elektrogoniometry**. Instrumenty te wykorzystują zmienny opornik lub potencjometr oraz mechaniczny system mocowania, tak aby obrót stawu stawał się obrotem potencjometru. W ten sposób możliwe jest bezpośrednie uzyskanie sygnału elektrycznego, który jest liniowo proporcjonalny do obracanego kąta. Istnieje również inny rodzaj elektrogoniometrów, tj. bazujące na **tensometrach** (rys. 14), których oprzyrządowanie jest znacznie mniej kłopotliwe, a które mierzą kąty w różnych płaszczyznach w zależności od tego, czy są jednoosiowe, dwuosiowe czy trójosiowe.



Rysunek 14 - Przykład komercyjnego bezprzewodowego systemu elektrogoniometrycznego (Biomec®) używanego do pomiaru kąta kolana (kolor niebieski) i stawu skokowego (kolor czerwony) podczas jazdy na rowerze.

Inklinometry

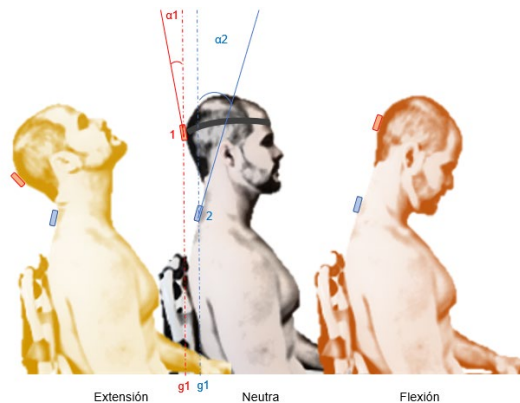
Inklinometry można zdefiniować jako przyrządy działające w oparciu o zasadę grawitacji, które odnoszą swoje pomiary do siły ciężkości, zerowej pozycji wyjściowej, wskazując je za pomocą igły lub płynu o określonej masie (rys. 15).

Inklinometry elektroniczne (rys. 15) są urządzeniami wykorzystującymi **akcelerometr** jako element czujnika. Akcelerometr ten wykorzystuje bezwładność masy umieszczonej na czujniku siły w celu pomiaru przyspieszenia grawitacyjnego. Zmiana przyspieszenia rejestrowana przez czujnik zależy od **kąta wychylenia** takiego czujnika, i odnosi się do wartości w stopniach.



Rysunek 15 - Inklinometr pęcherzykowy Baseline® Acu-Angle (po lewej) i inklino­metr elektroniczny DTS 2d Noraxon®.

Służą one głównie do oceny zakresu ruchu stawów, rejestrując stopień odchylenia od anatomicznej pozycji neutralnej różnych segmentów kończyn dolnych/górnych, a także kręgosłupa szyjnego, lędźwiowego i piersiowego. W tym celu umieszcza się je za pomocą pasków zaciskowych w jednej linii z badanymi segmentami ciała lub anatomicznymi punktami orientacyjnymi, takimi jak wyrostki kolczyste lub okolica potyliczna (rys. 16).



Ryc. 16 - Ocena zakresu ruchu kręgosłupa szyjnego. Wartość każdej pozycji jest wyodrębniona z różnicy pomiędzy wynikami inklino­metru 1 (kolor czerwony) i 2 (niebieski/niebieski), zmodyfikowany obraz z NedRangos/IBV.

Informacje uzyskane z akcelerometru umieszczonego na ciele zależą głównie od czterech czynników: pozycji, w jakiej jest umieszczony, orientacji jego położenia, pozycji ciała osoby oraz rodzaju czynności, którą dana osoba wykonuje [16].

Parametry

Inklinometry umożliwiają rejestrację kąta mierzonego względem pionu (określonego przez kierunek siły grawitacji) lub względem ustalonej pozycji odniesienia, jak również względnych kątów pomiędzy oprzyrządowanymi segmentami ciała.

Zalety i wady

Technika inklino­metryczna jest **łatwa** do zastosowania w warunkach terenowych i powoduje minimalne zakłócenia dla osoby wykonującej ruch, zwłaszcza przy pomiarach statycznych lub powolnych.

Głównymi wadami inklinometrów jest brak możliwości określenia płaszczyzny, w której występuje odchylenie od pionu (dlatego czujniki muszą być starannie ustawione względem płaszczyzny pomiaru) oraz fakt, że nie można ich stosować przy gwałtownych ruchach, ponieważ są wrażliwe na przyspieszenie.

GPS

Systemy oparte na lokalizacji poprzez Globalny System Nawigacji Satelitarnej (GNSS) nazywane są potocznie systemami opartymi na technologii GPS (Global Positioning System). Rozwój tych systemów pozycjonowania bazuje na zegarze atomowym, który zapewnia dokładny pomiar czasu i pozwala zidentyfikować upływ czasu pomiędzy nadaniem sygnału radiowego z satelity a jego odbiorem przez system odbiornika GPS na Ziemi.

Jeżeli znana jest odległość od satelity do odbiornika GPS i istnieje łączność z co najmniej czterema satelitami, odbiornik GPS można zlokalizować metodą triangulacji [17], a także określić jego kierunek i prędkość [18].

Systemy GPS są powszechnie stosowane na otwartych przestrzeniach, gdzie nie występują fizyczne zakłócenia uniemożliwiające poprawną komunikację i co za tym idzie powodowanie występowanie błędów w dokładności lokalizacji. W przypadku występowania problemów spowodowanych zakłóceniami ze strony dużych budynków lub specyficznych warunków atmosferycznych stosuje się pomiary różnicowe GPS (DGPS), poprzez zastosowanie stacjonarnych odbiorników umieszczonych w punktach naziemnych i porównywania ich stałych pozycji z pozycją nadaną przez satelitę [18]. W związku z tym, dla pomiarów wykonywanych w środowiskach zamkniętych, takich jak hale sportowe, istnieją systemy zawierające urządzenia wzmacniające znajdujące się w otoczeniu i/lub zawierające czujniki inercyjne w samym urządzeniu odbiorczym.

Głównymi elementami składającymi się na systemy GPS są nadajnik/odbiornik sygnału umieszczony na ciele osoby badanej, wzmacniacz sygnału umieszczony na poziomie podłoża, jeden lub więcej satelitów, lub lokalny system pozycjonowania dla środowisk zamkniętych lub dla miejsc, w których komunikacja jest utrudniona (rys. 17).

Oprócz informacji pochodzących z lokalizacji, takich jak prędkość i odległość, systemy te zazwyczaj zawierają akcelerometry, które dostarczają informacji na temat intensywności i rodzaju analizowanego ruchu.

Najbardziej zaawansowanym obszarem zastosowania tych systemów jest sport. Integracja informacji o ruchu przekazywanych przez te systemy wraz z fizjologicznymi, taktycznymi lub strategicznymi danymi nadaje tej technologii ogromny potencjał w sporcie.



Rysunek 17 - Elementy komunikacyjne urządzeń odbiorczych GPS.

Parametry

Głównymi parametrami pochodzącymi z systemów GPS to lokalizacja odbiornika (z dokładnością do centymetrów lub metrów w zależności od rodzaju systemu), kierunek, odległość, prędkość i przyspieszenie podczas analizy ruchu, treningu lub zawodów.

Systemy te mogą również zawierać akcelerometry lub systemy inercyjne, które mogą dostarczyć dokładniejszych informacji na temat ruchu: siły uderzenia generowane podczas ruchu, przyspieszenia charakteryzujące ruch lub podstawowe parametry spatio-temporalne, takie jak biomechanika chodu. Informacje na temat intensywności ćwiczeń można również uzyskać dzięki powiązaniu informacji fizjologicznych z wykorzystaniem pomiaru tętna.

Zalety i wady

Głównymi zaletami systemów GPS są: **małe wymiary**, **niska waga** i **mobilność urządzeń**, które można nabyć za rozsądną cenę; przede wszystkim nie przeszkadzają w wykonywaniu badanych ruchów; zapewniają swobodny dostęp do komunikacji z satelitami na całym świecie, co umożliwia pozyskiwanie informacji kontekstowych dla środowiska i analizowanej aktywności.

Wadą tych systemów jest **niski zasięg komunikacji** z dostępnym zestawem satelitów w niektórych miejscach, lub fakt, że dokładność pozycjonowania niektórych systemów nie jest odpowiednia do pomiaru specyficznych aktywności ruchowych.

5. Główne obszary zastosowań

Instrumentalne techniki analizy kinematycznej pozwalają na ilościowe określenie ruchu człowieka poprzez analizę różnych zmiennych. Zmienne te są określane w odpowiednio przygotowanych do scharakteryzowania badanego obiektu procedurach pomiarowych.

Taka instrumentalna analiza biomechaniczna jest często wdrażana i stosowana na co dzień. Dedykowany do badań sprzęt jest stale rozwijany, a ze względu na rozwój możliwości związanych z mobilnością i łatwością użycia, technologia ta jest coraz częściej wdrażana, przenoszona z laboratoriów badawczych do klinicznych gabinetów konsultacyjnych, a nawet do samych użytkowników. Ważne jest jednak, aby prawidłowo określić charakterystykę techniczną sprzętu, jak również procedury jego użytkowania, niezawodność i ważność w odniesieniu do zastosowań, do których są przeznaczone, co pozwoli uniknąć niewłaściwego wykorzystania przez profesjonalistów, nauczycieli lub użytkowników końcowych.

Obszary, w których techniki te są zazwyczaj stosowane to obszary kliniczny, sport i ergonomia. Niektóre z najczęstszych przypadków zastosowania w tych dziedzinach zostały szczegółowo wymienione poniżej.

Obszar kliniczny

W warunkach klinicznych główne zastosowania i sposoby wykorzystania tych technik są następujące:

- Charakteryzowanie ruchów prawidłowych i ruchów charakterystycznych dla określonych patologii, zarówno neurologicznych, jak i mięśniowo-szkieletowych.
- 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 technicznej.
- Uzyskanie wskaźników wyniku procedur rehabilitacyjnych w celu poprawy efektywności bieżących działań w tym zakresie.
- Ustanowienie wytycznych i ich monitorowanie za pomocą przenośnych technologii, które poprawiają przestrzeganie i motywację ludzi w określonych procesach dążących do poprawy zdrowia.

Sport

W dziedzinie sportu, główne zastosowania omawianych technik to:

- Monitorowanie techniki sportowej i poprawa wyników poprzez ilościowe korygowanie błędów i braków w wykonywaniu ruchów technicznych.
- Wspieranie profesjonalistów w ich technikach treningowych poprzez ocenę przyswajania treningu przez sportowca.

- Identyfikacja czynników ryzyka wystąpienia określonych urazów.
- Unikanie urazów poprzez doradzanie, jak bezpiecznie wykonywać techniki sportowe, w oparciu o informacje dostarczane przez te techniki.
- Monitorowanie postępów w odniesieniu do różnych zmiennych w procesie rehabilitacji sportowej, co pomaga w powrocie do zdrowia i adaptacji do praktyki sportowej.

Ergonomia

Głównymi zastosowaniami technik instrumentalnych w dziedzinie ergonomii w miejscu pracy i projektowaniu produktów są:

- Ocena/opis ryzyka wystąpienia dolegliwości mięśniowo-szkieletowych związanych z daną pracą.
- Charakterystyka powtarzających się pozycji i ruchów stawów związanych z konkretną pracą.
- Identyfikacja wzorców zachowań będących wynikiem zmęczenia mięśni i obciążeniem podczas wykonywania zadań związanych z pracą.
- Pomoc w przeprojektowaniu i walidacji stanowisk pracy i produktów.
- Ocena urządzeń i narzędzi wspomagających ergonomiczny sposób wykonywania pracy.
- Rozwój produktu zgodnie z kryteriami ergonomii.

6. Przykłady

Niniejszy rozdział zawiera kilka przykładów w zakresie badań i profesjonalnych zastosowań różnych technik instrumentalnych do analizy ruchu przeznaczonych dla specjalistów.

W ostatnich latach ukazuje się coraz więcej prac z zakresu badań **klinicznych** związanych z analizą biomechaniczną, co świadczy o rosnącym zainteresowaniu informacjami wydobywanymi z zastosowania opisanych technik. Informacje te znajdują zastosowanie przede wszystkim w obszarach związanych z funkcjonalną oceną wydolności człowieka, charakterystyką różnych patologii, ustalaniem i planowaniem rehabilitacji itp.

Rozwój technologii mobilnych przyczynił się do rozwoju sprzętu i systemów diagnostycznych, które mogą być wykorzystywane przez pracowników służby zdrowia w warunkach ambulatoryjnych i nie są ograniczone do badań realizowanych w warunkach laboratoryjnych.

Charakterystyka patologii

Chód człowieka jest jedną z najczęściej badanych czynności na poziomie klinicznym. Badania analizy chodu człowieka z zastosowaniem specjalnego oprzyrządowania zostały szeroko rozwinięte, aby zrozumieć zasady prawidłowego chodu człowieka i prowadzić późniejsze analizy w zakresie różnych patologii (które wpływają na układ mięśniowo-szkieletowy).

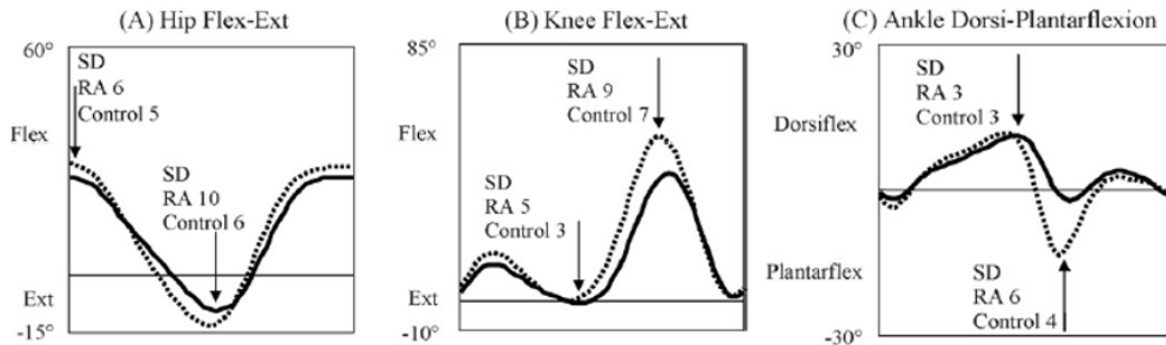
Kliniczna analiza chodu pozwala uzyskać informacje na temat stanu rozwoju i rokowania niektórych patologii poprzez analizę parametrów kinematycznych, które są skorelowane z różnymi funkcjonalnymi aspektami chodu. Specyfika niektórych zmian jest odzwierciedlona w pewnych parametrach, zarówno kinematycznych, jak i kinetycznych, a badania są przeprowadzane w celu określenia ich zwalidowania poprzez porównanie ich ze skalami klinicznymi lub innymi testami funkcjonalnymi.

Na przykład w pracy Weissa i wsp. [19] "Gait pattern in rheumatoid arthritis" analizuje się parametry kinematyczne i dynamiczne zarówno u osób z reumatoidalnym zapaleniem stawów (RZS), jak i w grupie kontrolnej w celu określenia, czy istnieją parametry, które określają poziom funkcjonalności związany ze skalą Health Assessment Questionnaire (HAQ)-scores.

U osób z RZS może dochodzić do zmian w zakresie prawidłowego wzorca chodu spowodowanych zmianami zwyrodnieniowymi stawów, co prowadzi do zmian funkcjonalnych i pogorszenia jakości życia.

Techniką instrumentalną zastosowaną do zapisu kinematycznego jest fotogrametria 3D z systemem analizy Vicon Motion System® (Oxford, UK) składającym się z 6 kamer. Modelem analizy chodu jest Plug in Gait (PiG), dostarczony przez system Vicon® motion capture. Model ten składa się z 34 markerów umieszczonych na anatomicznych punktach orientacyjnych głowy, tułowia, ramion, miednicy, nóg i stóp.

Najbardziej godnym uwagi wynikiem opisującym kinematykę ruchu w zakresie tego badania jest zmniejszenie zakresu stawowego obserwowane w tułowiu, biodrze, kolanie i stawie skokowym (rys. 18). Ponadto, zaobserwowano korelację niektórych parametrów kinematycznych z wynikami uzyskanymi z HAQ. Badania te mogą być przydatne w zrozumieniu, w jaki sposób RZS wpływa na zmiany chodu i ruchu kończyn dolnych.

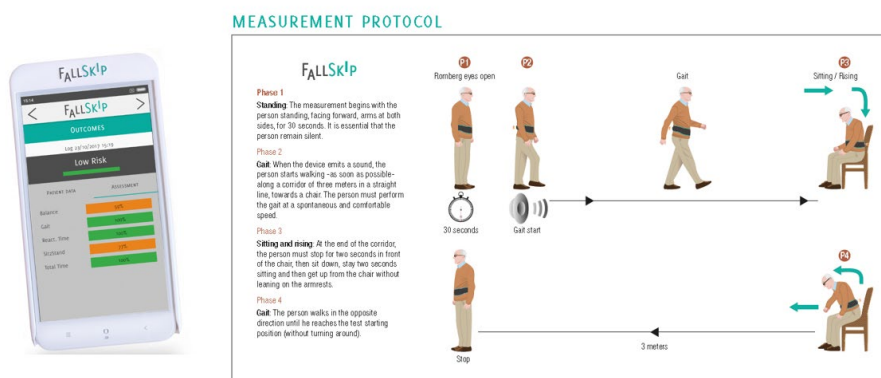


Rysunek 18. Kinematyka grupy z RZS i grupy kontrolnej. Kąty zgięcia/wyprostu biodra (A) i kolana (B) oraz zgięcia grzbietowego/płaskiego stawu skokowego (C) podczas cyklu chodu. Linia ciągła (-): grupa kontrolna, linia przerywana: (- -) grupa RZS. Dla wszystkich maksymalnych parametrów przedstawiono odchylenie standardowe (SD); przykłady z Weiss et al. [19].

Ocena funkcjonalna

Upadek stanowi jedną z aktualnych problemów dotyczących osoby powyżej 65 roku życia. Szacuje się, że co trzecia osoba w starszym wieku ulega upadkowi regularnie każdego roku, co stanowi drugą na świecie przyczynę przypadkowej lub niezamierzonej śmierci. Upadki oznaczają pogorszenie samodzielności osób starszych, obniżając ich jakość życia. Tradycyjne narzędzia do oceny ryzyka upadku mają pewne ograniczenia, takie jak subiektywność, w przypadku skal funkcjonalnych, lub fakt, że są one czasochłonne do zastosowania w codziennej praktyce klinicznej, w bardziej kompleksowych badaniach.

Narzędzia oparte na technikach instrumentalnych są obecnie rozwijane w celu zapewnienia rozwiązań dostosowanych do potrzeb pracowników służby zdrowia. Przykładowo, system FallSkip wykorzystuje czujniki inercyjne urządzenia mobilnego do pozyskania informacji podczas wykonywania prostego zestawu testów w warunkach klinicznych. Test ten (rys. 19), oparty na zmodyfikowanym protokole testu Time Up and Go (TUG), gromadzi określone parametry związane z chodem, równowagą, kontrolą motoryczną i siłą mięśni. Parametry te są związane z oceną ryzyka upadku u osób starszych.



Rysunek 19 – Urządzenie mobilne i protokół pomiarowy systemu FallSkip; obrazy pobrane z <http://fallskip.com/>

Jego celem jest usprawnienie i uproszczenie procesu ekstrakcji zróżnicowanych obiektywnych informacji na podstawie zmiennych biomechanicznych, które pozwalają poznać stan funkcjonalny osoby w odniesieniu do ryzyka upadku.

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

Instrumentalne techniki analizy biomechanicznej pozwalają na uzyskanie informacji ilościowych związanych z technikami treningowymi, doбором materiału treningowego lub monitorowaniem zmiennych związanych z wydajnością i ochroną zdrowia [20].

Dobór sprzętu sportowego

Przykładem badań nad analizą kinematyczną biegu i doбором obuwia jest opracowanie narzędzi takich jak system Runalytics® przez Instituto de Biomecánica of Valencia (IBV). System ten przeprowadza w czasie rzeczywistym analizę kątów stawów stopy podczas stania w chodzie biegowym i klasyfikuje je w zależności od typu stopy (pronator, supinator, neutralny), wykorzystując klasyfikatory oparte na technikach zarządzania danymi i uczeniu maszynowym. System ten wykorzystuje technikę analizy opartą na obrazach wideo wraz z markerami rzeczywistości rozszerzonej umieszczonymi w nodze i tylnej części stopy biegacza, co umożliwi pomiar względnego ruchu w przestrzeni 3D segmentów ciała nogi i stopy (rys. 20). Analiza ta pozwala na określenie rodzajów śladu stopy uzyskanego podczas biegu i dobór najbardziej odpowiedniego obuwia.



Rysunek 20 – System Runalytics© do analizy śladu podczas biegu; obrazy pobrane z <http://www.runalytics.es/>

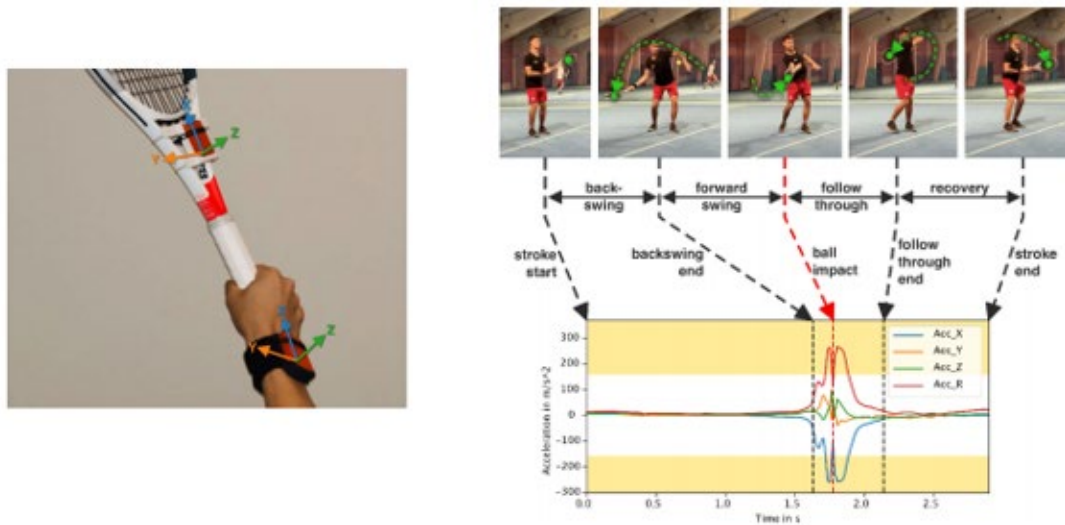
Ocena technik sportowych

Ocena techniczna sportowców jest niezbędnym procesem do oceny indywidualnej efektywności i adaptacji do dyscypliny sportowej. Ocena ta pozwala poznać możliwości sportowca i stworzyć podstawy do późniejszego planowania i interwencji w procesie treningowym. W dzisiejszych czasach, ciągły postęp w różnych aspektach przygotowania sportowca, takich jak odżywianie, kondycja fizyczna, etc., sprawia, że obiektywna i dokładna ocena techniki sportowej jest czynnikiem różnicującym i pozwalającym osiągnąć lepsze wyniki.

Jednym z celów oceny techniki sportowej jest analiza zmiennych, które występują w różnych kluczowych zdarzeniach podczas wykonywania ruchu sportowego, w celu wykrycia braków, możliwości poprawy i/lub efektów szkolenia. Tradycyjnie, ten rodzaj oceny był przeprowadzany przez trenerów poprzez bezpośrednią obserwację, która jest prostą i szybką metodą, ale wymaga doświadczenia i wiedzy ze strony badającego. Wprowadzenie technik instrumentalnych zapewnia obiektywny zapis określonych, kwantyfikowalnych parametrów analizowanego ruchu lub dyscypliny. Obecnie przenośne i nieinwazyjne systemy umożliwiają przeprowadzenie tego typu oceny w kontekście sportowym, zapewniając realizm i wiarygodność, podczas gdy oceny laboratoryjne oferują takie zalety jak obiektywność, standaryzacja i wiarygodność [21].

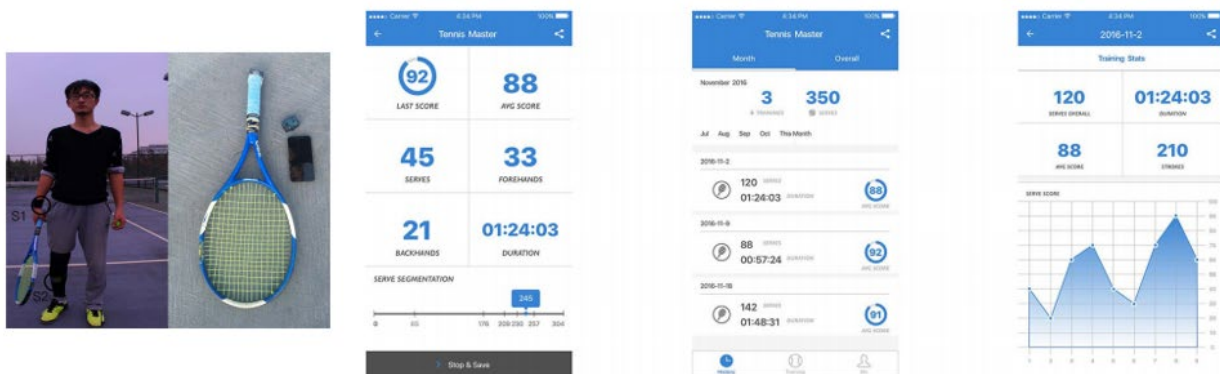
W przypadku tenisa poniżej przedstawiono dwa przykłady zastosowania technik instrumentalnych do analizy kinematycznej. Oba przykłady koncentrują się na analizie techniki sportowej.

Praca Ebnera i Findlinga [21] "Tennis Stroke Classification: Comparing Wrist and Racket as IMU Sensor Position" bada metodologię wykrywania i klasyfikacji 8 uderzeń występujących w tenisie oraz przedstawia wizualizację różnic w prędkościach kątowych i przyspieszeniach w przestrzeni 3D wyodrębnionych na podstawie informacji dostarczanych przez dwa czujniki inercyjne: jeden umieszczony w rakiecie, a drugi w nadgarstku gracza (rys. 21).



Rysunek 21 – Montaż czujników inercyjnych w rakiecie i nadgarstku (po lewej) oraz przykład przyspieszeń rejestrowanych w różnych fazach uderzenia (po prawej); obrazy z Ebner y Findling [22].

Praca Yang et al. [23] "TennisMaster: an IMU-based online serve performance evaluation system" przedstawia system oceny wydajności ruchu serwu podczas treningu. Informacje pozyskiwane są również z dwóch jednostek inercyjnych umieszczonych na piszczeli i nadgarstku zawodnika (rys. 22).



Rysunek 22 – Montaż czujników inercyjnych (S1) na spodzie rakiety (S2), oraz na piszczeli zawodnika (po lewej). Przykładowe zrzuty ekranu aplikacji pokazujące wynik serwu, liczbę uderzeń, historię treningu itp. (po prawej). Obrazy z Yang et al. [23].

Systemy te pozwalają na ilościowe określenie obciążenia wykonywanego przez zawodnika i poziomu wydajności, co pomaga trenerowi w planowaniu treningu, jak również zawodnikowi poprzez przekazywanie mu informacji zwrotnej na temat treningu.

W dziedzinie ergonomii, wykorzystanie technik instrumentalnych do rejestrowania ruchomości stawów, pozycji różnych segmentów ciała, zasięgu i wykonania zadania, umożliwia prowadzenie badań, studiów i opracowywanie metodologii w celu prawidłowego dostosowania środowisk i produktów. W kontekście pracy ważne jest rejestrowanie i kwantyfikowanie zmiennych związanych z ruchomością i pozycją określonych segmentów ciała w konkretnych zadaniach na danym stanowisku. Informacje te pozwalają określić, na przykład, ryzyko wystąpienia zaburzeń mięśniowo-szkieletowych poprzez ocenę ryzyka związanego z pracą za

pomocą metodologii opartych na analizie niewygodnej postawy, powtarzających się ruchów itp.

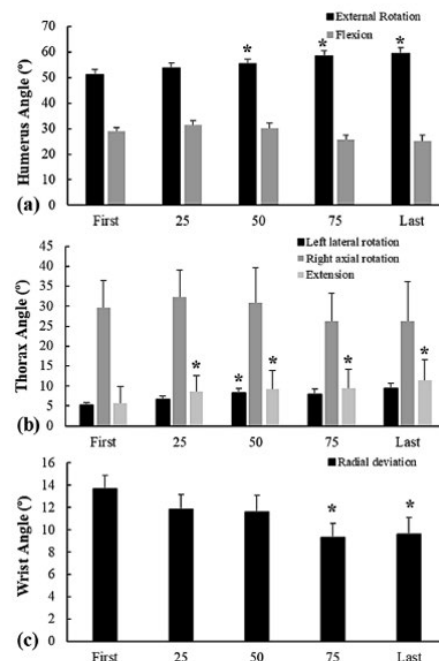
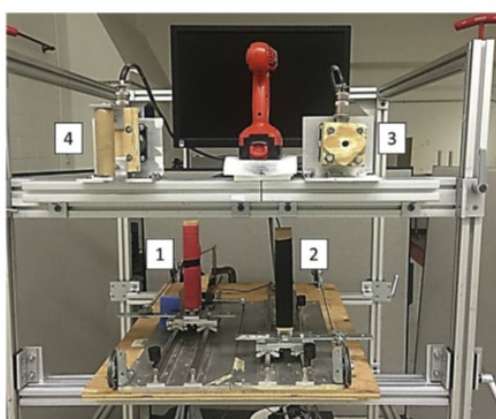
W tym kontekście, jako przykład zastosowania, przedstawiono dwa badania związane z ergonomią w miejscu pracy.

Charakterystyka zadań roboczych

Ruchy powtarzalne występują często na wielu stanowiskach pracy i mogą prowadzić do występowania dolegliwości mięśniowo-szkieletowych w obrębie kończyn górnych. W pracy McDonald i wsp. [24] "Muscular and kinematic adaptations to fatiguing repetitive upper extremity work" wskazano na badania dotyczące występowania zmęczenia w konkretnych zadaniach angażujących kończynę górną, jak również zmian kinematyki wzorców ruchu w czasie.

Do analizy ruchu wykorzystano system Raptor-4 firmy Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, (CA). Jedenaście kamer rejestrujących obraz z częstotliwością 50 Hz oraz model 72 markerów odbiciowych wykorzystano do uzyskania kątów 3D w stawach nadgarstka, łokcia, barku i tułowia. Do symulacji tych zadań wykorzystano stację roboczą zaprojektowaną w laboratorium ruchu wraz z innymi technikami instrumentalnymi, takimi jak elektromiografia powierzchniowa i platforma siłowa (rys. 23).

Jednym z głównych wniosków z badania jest fakt, że adaptacje mięśniowe i wzorce kinematyczne są zależne od zadania i czasu (rys. 23). Badania te mogą pomóc w dalszej analizie zmian postawy ciała, jakie zachodzą podczas wykonywania określonych zadań, w zależności od obciążenia i czasu ich wykonywania, a tym samym dostarczyć rozwiązań i strategii minimalizujących ewentualne zagrożenia dla układu mięśniowo-szkieletowego.

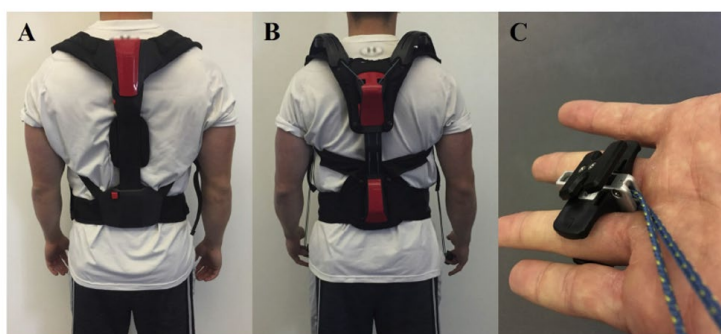


Rysunek 23 - Stanowisko robocze z czterema zadaniami: (1) zadanie ciągnięcia, (2) zadanie pchania, (3) zadanie wiercenia i (4) zadanie celu góra/dół z 2 poziomami siły (po lewej). Różnice kątów w różnych stawach w czasie podczas zadania wiercenia (po prawej). Obrazy z McDonald et al. [24].

Ocena urządzeń wspomagających

Nieprawidłowa postawa ciała lub wykonywanie czynności związanych z przenoszeniem i podnoszeniem ciężarów to często powtarzające się atrybuty określonych stawisk, zwłaszcza w sektorze przemysłowym. Ponadto, schorzenia kręgosłupa lędźwiowego są jednym z najbardziej rozpowszechnionych zaburzeń we współczesnym społeczeństwie. W związku z tym w środowisku pracy sektora przemysłowego przeprowadzono interwencje związane z ergonomicznym dostosowaniem narzędzi i stanowisk pracy; podobnie opracowano urządzenia pomocne w zadaniach związanych z przenoszeniem ciężarów, aby zminimalizować ryzyko urazów kręgosłupa lędźwiowego lub kończyn górnych. Jednym z najnowszych urządzeń, które są obecnie stosowane, są egzoskielety. Systemy te mogą być zarówno aktywne, zawierające siłowniki wspomagające osobę, jak i pasywne, których głównym zadaniem jest podtrzymywanie i odciążanie poprzez różne elementy, takie jak sprężyny, amortyzatory lub materiały mające zdolność magazynowania energii i zwracania jej osobie w odpowiednim momencie

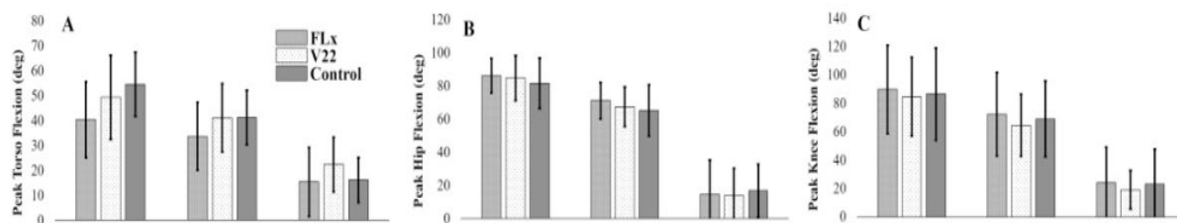
W pracy Picchiotti i wsp. [25] "Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of lumbar spine" badano zachowanie dwóch różnych modeli egzoskieletów (rys. 24), analizując zmienne kinematyczne oraz aktywność i siłę mięśni.



Rysunek 24 - obrazy egzoskieletów testowanych w badaniu: FLx (A), V22 (B) i siłownik ręczny V22, obrazy z Picchiotti et al. [25].

Techniką instrumentalną zastosowaną do analizy ruchu jest optyczny system motion capture składający się z 42 kamer Prime 41 OptiTrack (Natural Point, Corvallis, OR, USA) z modelem całego ciała składającym się z 41 markerów, których położenie w ciele jest określone przez oprogramowanie OptiTrack motion capture. Częstotliwość rejestracji jest realizowana z częstotliwością 120 Hz.

W niniejszej pracy porównano wyniki kątów zgięcia w stawach tułowiowych, biodrowych i kolanowych podczas zadań związanych z podnoszeniem z użyciem obu egzoskieletów oraz w warunkach kontrolnych (rys. 25). Dodatkowo, obliczono momenty na poziomie stawu L5/S1 oraz obciążenie biomechaniczne tkanek kręgosłupa lędźwiowego, wykorzystując informacje dynamiczne.



Rysunek 25 - Różnice w szczytowym zgięciu kolana między dwoma ocenianymi egzozkieletami a grupą kontrolną na poziomie tułowia (A), biodra (B) i kolana (C); obrazy pobrane z Picchiotti et al. [25].

Badania te pomagają zrozumieć, w jaki sposób urządzenia te mogą przyczynić się do poprawy postawy podczas wykonywania niektórych zadań oraz jaki jest ich związek lub wpływ na zmiany obciążenia odcinka lędźwiowego (w przypadku niniejszego badania) lub innych segmentów, takich jak kończyny górne w egzozkieletach zaprojektowanych w tym celu.

7. Kluczowe zagadnienia

Kluczowymi zagadnieniami niniejszej jednostki dydaktycznej są:

- Istnieją różne techniki analizy ruchu.
- Najbardziej popularne techniki opierają się na analizie obrazów lub sygnałów z czujników, takich jak akcelerometry, żyroskopy, itp.
- Główne parametry uzyskane z zastosowaniem tych technik są związane z ustawieniem segmentów ciała, zakresem stawów, przyspieszeniem i prędkością.
- Konieczne jest poznanie charakterystyki technicznej i specyfikacji różnych technik, jak również ich procedur pomiarowych, tak aby wybrać technikę dostosowaną do obiektu, który ma być analizowany.
- Instrumentalne techniki analizy biomechanicznej mają wiele zastosowań i są stosowane w takich dziedzinach jak klinika, sport i ergonomia.
- Ciągły rozwój technologiczny, jak np. przenośne systemy rejestracji połączone z aplikacjami mobilnymi, pozwoli na rozwój nowych aplikacji do oceny biomechanicznej i rozszerzy zakres ich zastosowania.

8. Bibliografia

- [1] Colyer, S.L., Evans, M., Cosker, D.P. et al. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. *Sports Med - Open* (2018) 4: 24. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0139-y>.
- [2] Ancillao, A. "Analysis and Measurement of Human Motion: Modern Protocols and Clinical Considerations". *J Robot Mech Eng Resr* (2016),1(4): 30 -37.
- [3] Pueo et al." Application of motion capture technology for sport performance analysis" *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, 2017;32: 241-247.
- [4] Van der Kruk, E., Reijne, M.M." Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review", *European Journal of Sport Science*, 2018 18 (6): 806-819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>.
- [5] Cuesta-Vargas, A., Galán-Mercant, A., Williams, J.M. "The use of inertial sensors system for human motion analysis". *Physical Therapy Reviews*, 2010;15(6): 462-473. <https://doi.org/10.1179/1743288X11Y.0000000006>.
- [6] Siltanen, S. (2012). Siltanen S. Theory and applications of marker-based augmented reality: Licentiate thesis. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2012. 250 p.
- [7] Wagner, Daniel & Schmalstieg, Dieter. (2007). ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices.
- [8] Nagymáté G, Kiss RM (2019) Affordable gait analysis using augmented reality markers. *PLoS ONE* 14(2): [e0212319](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319>.
- [9] Dyce, W., Rodriguez, N., Lange, B., Andary, S., Seilles, A. Tabu search for human pose recognition. *3DIPM: 3D Image Processing, Measurement*, Feb 2014, San Francisco, United States. [ff10.1117/12.2040563](https://doi.org/10.1117/12.2040563). [ffhal-01061640f](https://doi.org/10.1117/12.2040563).
- [10] Kistler, Felix & Lugrin, Birgit & Damian, Ionut & Dang, Chi Tai & Andre, Elisabeth. Natural interaction with culturally adaptive virtual characters. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2012; 6. 39-47. [10.1007/s12193-011-0087-z](https://doi.org/10.1007/s12193-011-0087-z).
- [11] Cronin, N.J., Rantalainen, T., Ahtiainen, J.P., Hynynen, E., Waller B. Markerless 2D kinematic analysis of underwater running: A deep learning approach. *Journal of Biomechanics* 87 (2019) 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.02.021>.
- [12] Picerno, P. "25 years of lower limb joint kinematics by using inertial and magnetic sensors: A review of methodological approaches". *Gait & Posture* 51 (2017) 239–246. [http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.008).
- [13] Al Amri, M. et al. "Inertial Measurement Units for Clinical Movement Analysis: Reliability and Concurrent Validity". *Sensors* 2018, 18, 719; [doi:10.3390/s18030719](https://doi.org/10.3390/s18030719).

- [14] Christenson, J. Chapter Three - Sensors and Transducers. Handbook of Biomechatronics; 2019, Pages 61-93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00003-9>.
- [15] Nancy Berryman Reese, William D. Bandy. Joint Range of Motion and Muscle Length Testing. Ed. Saunders, 2002. ISBN 0721689426, 9780721689425.
- [16] Godfrey, A., Conway, R., Meagher, D., ÓLaighin, G. Direct measurement of human movement by accelerometry. Medical Engineering & Physics. Volume 30, Issue 10, December 2008, Pages 1364-1386. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.09.005>.
- [17] Aughey, Robert.J. Applications of GPS Technologies to Field Sports. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2011, 6, 295-310.
- [18] Maddison, R., Ni Mhurchu, C. Global positioning system: a new opportunity in physical activity measurement. Int J Behav Nutr Phys Act 6, 73 (2009) [doi:10.1186/1479-5868-6-73](https://doi.org/10.1186/1479-5868-6-73).
- [19] Weiss, R. J., Wretenberg, P., Stark, A., Palmblad, K., Larsson, P., Gröndal, L., & Broström, E. Gait pattern in rheumatoid arthritis. Gait & posture, 2008;28(2): 229-234.
- [20] Page del Pozo, A.F., Porcar Seder, R.M. "Biomecánica y eHealth. Aplicaciones basadas en tecnologías de uso masivo", in Tecnología Digital para la salud y la actividad física, Aladro Gonzalvo, A.R., Arbinaga Ibarzábal, F, Ed.Madrid: Pirámide, 2019, pp. 127 – 146.
- [21] Morante, J.C. "Evaluación de la técnica deportiva" en en Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, M. Izquierdo, Ed. Buenos Aires, Madrid: Médica Panamericana, 2008, pp. 157 – 171.
- [22] Ebner, C., Findling, R. D. (2019). Tennis Stroke Classification: Comparing Wrist and Racket as IMU Sensor Position. [10.1145/3365921.3365929](https://doi.org/10.1145/3365921.3365929).
- [23] Yang, D., Tang, J., Huang, Y., Xu, C. Li, J., Hu, L., Shen, G., Liang, C.M., Liu, H. 2017. TennisMaster: an IMU-based online serve performance evaluation system. In Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference (AH '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 17, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3041164.3041186>.
- [24] McDonald, A. C., Mulla, D. M., & Keir, P. J. Muscular and kinematic adaptations to fatiguing repetitive upper extremity work. Applied ergonomics, 2019; 75: 250-256.
- [25] Picchiotti, M. T., Weston, E. B., Knapik, G. G., Dufour, J. S., & Marras, W. S. Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of the lumbar spine. Applied ergonomics, 2029; 75: 1-7.



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 jakiegokolwiek wykorzystanie informacji w niej zawartych.

