

## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T1. Potrzeba wykorzystywania modeli materialnych i symulacyjnych w biomechanice

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## WPROWADZENIE

- ❖ Badania eksperymentalne, w warunkach rzeczywistych lub zbliżonych do rzeczywistych, stanowią istotny element procesu poznawczego w każdej dziedzinie wiedzy.
- ❖ Jednakże, ze względu na główny **obiekt badań** biomechaniki (**człowieka**) możliwości wykorzystywania badań eksperymentalnych są ograniczone.
- ❖ Szczególnie dotyczy to badań w warunkach dużych obciążeń wynikających z działania zewnętrznych sił, momentów sił, przyspieszeń i będących ich efektem przemieszczeń/odkształceń, czy też innych zjawisk przekraczających granice naturalnych tolerancji.
- ❖ W przypadku części zadań biomechaniki, np. w biomechanice udarowej badania rzeczywistych „objektów” (ochotników) w warunkach zbliżonych do rzeczywistych mogłyby prowadzić do ciężkich urazów a nawet śmierci.
- ❖ Badania z udziałem ochotników są prowadzone, ale tylko w bardzo ograniczonym zakresie dla skrajnie niskich obciążeń; dawno już zaniechano prowadzenia badań, w warunkach bardzo dużego ryzyka, jakie prowadzono (np. USAF, płk. P. Stapp) w pierwszych latach po II WŚ.



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## WPROWADZENIE

- ❖ W wielu sytuacjach istnieje zatem potrzeba wykorzystywania do badań eksperymentalnych obiektów zastępczych:

- modeli materialnych (zwłok, zwierząt i specjalnych manekinów)



- oraz modeli wirtualnych/symulacyjnych (pozwalających na uzyskanie istotnych odpowiedzi na wiele pytań z zakresu biomechaniki na podstawie zupełnie bezpiecznych obliczeń komputerowych).



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## WPROWADZENIE

- ❖ **Badania w warunkach rzeczywistych**, prowadzone są często np. na potrzeby ergonomii, niektórych dyscyplin sportowych czy też (w ograniczonym zakresie) medycyny, kiedy możliwe jest zbieranie istotnych dla analizy biomechanicznej danych praktycznie bez ingerencji w normalne czynności/obciążenia osób badanych, przy wykorzystaniu aparatury umożliwiającej dokonywanie pomiarów bezkontaktowych (np. systemy optyczne zapisu i analizy ruchu) lub praktycznie nieodczuwalnych dla badanego (np. wykorzystanie miniaturowych czujników o znikomej masie) lub badań wykonywanych na potrzeby diagnostyki medycznej.



[[http://www.csc.kth.se/~sullivan/actvis/images/part\\_ex0.png](http://www.csc.kth.se/~sullivan/actvis/images/part_ex0.png)]

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## OCHOTNICY

**Badania z udziałem ochotników**  
(badania wymagają zgody odpowiednich komisji etycznych)

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pełna zgodność antropometryczna</li> <li>Aktywna praca mięśni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tylko testy dla małych i umiarkowanych obciążeń</li> <li>Ochotnicy (zwykle młodzi i zdrowi, częściej mężczyźni niż kobiety) nie stanowią próbki reprezentatywnej dla całej populacji</li> </ul>



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — PMHS

**Badania z wykorzystaniem zwłok/materiału biologicznego**  
(prowadzone są badania zarówno z wykorzystaniem kompletnych zwłok, jak też wybranych segmentów, np. kończyn; badania tego typu podlegają ścisłym regulacjom prawnym i wymagają zgody odpowiednich komisji etycznych)

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zgodność antropometryczna</li> <li>Zbliżone własności układu szkieletowego jak u żywego człowieka</li> <li>Możliwe prowadzenie testów przy wysokich obciążeniach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uwarunkowania religijne i etyczne</li> <li>Zmienione własności tkanek miękkich</li> <li>Brak aktywnej pracy mięśni</li> <li>Brak reprezentatywności próbki dla całej populacji (zwłoki zwykle ludzi starszych, często schorowanych)</li> </ul>



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — ZWIERZĘTA

**Badania z wykorzystaniem zwierząt**  
(zwierzęta wykorzystywane w eksperymentach są wcześniej znieczulane; badania tego typu podlegają ścisłym regulacjom prawnym i wymagają zgody odpowiednich komisji etycznych)

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Możliwość porównań wyników eksperymentów prowadzonych na zwierzętach żywych i uśmierconych</li> <li>Możliwe prowadzenie testów przy wysokich obciążeniach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bardzo istotne różnice anatomiczne, brak możliwości bezpośredniego wykorzystywania wyników</li> </ul>



[http://dingo.care2.com/pictures/c2c/share/26/266/670/2667097\\_370.jpg](http://dingo.care2.com/pictures/c2c/share/26/266/670/2667097_370.jpg)

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

**Badania z wykorzystaniem manekinów (crash dummies)**  
(manekiny używane do testów muszą być właściwie kalibrowane; odpowiednie przepisy określają protokoły prowadzenia badań homologacyjnych czy też konsumenckich — typu EuroNCAP, przygotowania manekinów i stanowisk badawczych, a także wymogów dotyczących rejestracji i wstępnej obróbki sygnałów rejestrowanych w czasie testu)

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Geometria, rozkład masy, kinematyka (istotnych dla danego typu zastosowań) stawów podobne jak u człowieka</li> <li>Bardzo dobra powtarzalność uzyskiwanych (dla określonych warunków eksperymentu) wyników — ważne w zastosowaniach np. homologacyjnych</li> <li>Manekiny można wykorzystywać wielokrotnie</li> <li>Duża łatwość montażu czujników pomiarowych rejestrujących istotne parametry w czasie testu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generalnie — parametry materiałowe różne od własności żywych tkanek</li> <li>Urządzenie mechaniczne zaprojektowane do przetrwania wielu testów — brak możliwości obserwacji „urazów” typowych dla obiektów biologicznych</li> </ul>

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY



<http://mariehicks.net/blog/wp-content/uploads/2013/02/CrashTestDummies.jpg>



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

Manekiny — przykład: WorldSID 50<sup>th</sup> Percentile, male



<http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/PC-WorldSID-50th.pdf>



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

### Różnorodność manekinów

#### Zderzenia czołowe:

Hybrid II,  
Hybrid III,  
THOR,  
...

#### Zderzenia boczne:

SID, ES,  
WorldSID  
...

#### Zderzenia tylne:

Bio-RID  
...

#### Dzieci:

noworodek,  
6, 12, 18 m.,  
3, 6, 10 lat,  
...

#### Dzieci:

CAMI, CRABI,  
Hybrid III,  
Seria-P,  
Seria-Q  
...

#### Piesi:

Hybrid III,  
Leg forms,  
Head forms,  
...

## MANEKINY

#### Dorośli:

5-, 50-, 95-centyli

kobieta

mężczyzna

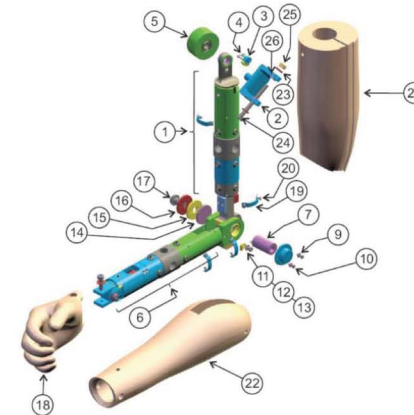
#### Wojskowe i lotnicze:

FAA Hybrid III,  
ADAM,  
MIL-SID,  
MIL-LX Legs,  
Parachute,  
...

## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

Manekiny — przykład: WorldSID 50<sup>th</sup> Percentile, male

### WorldSID 50th Percentile (jedna z opcji prawej kończyny górnej)



<http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/PC-WorldSID-50th.pdf>



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



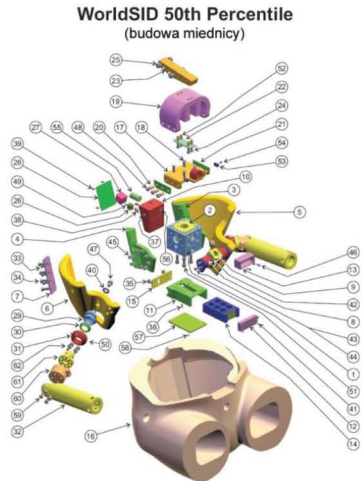
### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

Manekiny — przykład: WorldSID 50<sup>th</sup> Percentile, male



<http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/PC-WorldSID-50th.pdf>

**WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI**

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

Manekiny — przykład: Children Q-series



<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/children/q-series>

**WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI**

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

Typowe pomiary— przykład: WorldSID 50<sup>th</sup> Percentile, male

Lokalizacja	Specyfikacja	Kanały pomiarowe
Głowa	przyspieszenie liniowe środka masy przyspieszenie kątowe przemieszczenie kątowe	Ax, Ay, Az Ax, Ay, Az Rx, Ry
Szyja	siły i momenty sił - góra siły i momenty sił - dół	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz
Ramię	żebro - przyspieszenie liniowe żebro - przemieszczenie siły w stawie „ramiennym”	Ax, Ay, Az Dy Fx, Fy, Fz
Pełna kończyna górna	siły i momenty sił w ramieniu siły i momenty sił w przedramieniu momenty sił w stawie łokciowym przemieszczenie kątowe w stawie łokciowym przyspieszenie liniowe stawu łokciowego przyspieszenie liniowe nadgarstka	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz Mx, My Dy Ax, Ay, Az Ax, Ay, Az
Klatka piersiowa	przyspieszenie liniowe - górne żebro odkształcenie - górne żebro przyspieszenie liniowe - środkowe żebro odkształcenie - środkowe żebro przyspieszenie liniowe - dolne żebro odkształcenie - dolne żebro	Ax, Ay, Az Dy Ax, Ay, Az Dy Ax, Ay, Az Dy

<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/side-impact/worldsid-50th>

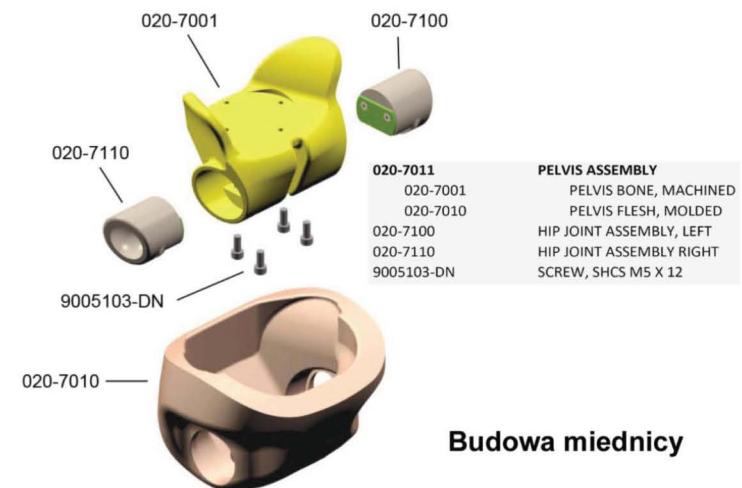
**WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI**

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

Manekiny — przykład: Children Q-series



<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/children/q-series>

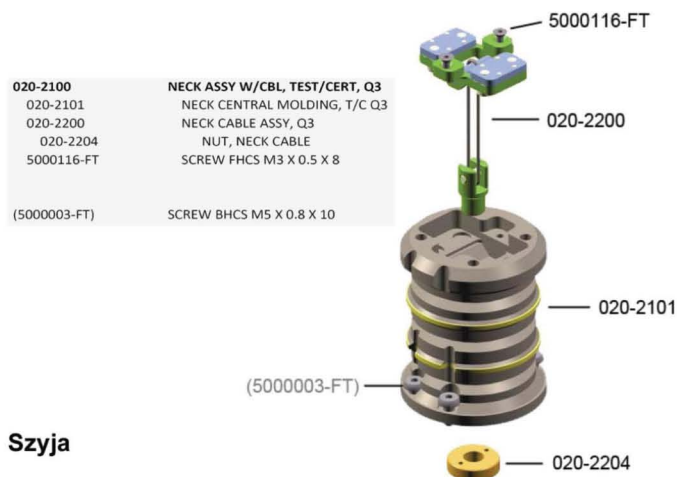
**WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI**

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

### Manekiny — przykład: Children Q-series



Szyja

[http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/file/Q3%20Child%20Parts%20Catalog\(1\).pdf](http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/file/Q3%20Child%20Parts%20Catalog(1).pdf)

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE MATERIALNE — MANEKINY

### Możliwe pomiary — przykład: Children Q-series

Czujniki pomiarowe manekina 3 letniego dziecka (serii Q3), firmy Humanetics	
Lokalizacja	Specyfikacja
Głowa	Ax, Ay, Az - przyspieszenia liniowe $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - przyspieszenia kątowe (opcja)
Szyja góra	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz - 3 składowe sił i momentów sił
Szyja dół	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz - 3 składowe sił i momentów sił
Kręgosłup piersiowy	Ax, Ay, Az - przyspieszenia liniowe
Klatka piersiowa	Dx lub Dy - odkształcenia Ax lub Ay - przyspieszenia liniowe (opcja)
Kręgosłup lędźwiowy	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz - 3 składowe sił i momentów sił
Miednica	Ax, Ay, Az - przyspieszenia liniowe

Na podstawie: [http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/file/Q3\\_sensors\(1\).pdf](http://www.humaneticsatd.com/sites/default/files/file/Q3_sensors(1).pdf)

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE WIRTUALNE/SYMULACYJNE

Możliwości, jakie w ostatnich latach stworzył bardzo szybki rozwój mocy obliczeniowej komputerów oraz rozwój metod numerycznych sprawiły, że **symulacja komputerowa (wykorzystanie modeli wirtualnych)** staje się coraz częściej metodą „z wyboru” również dla rozwiązywania zadań z zakresu biomechaniki udarowej

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>możliwość wykorzystania do uogólnienia i „skalowania” wyników uzyskiwanych z badań doświadczalnych,</li> <li>możliwość oceny nowych rozwiązań konstrukcyjnych systemów bezpieczeństwa na etapie ich projektowania,</li> <li>obniżenie kosztów itp.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>konieczność wprowadzania wielu założeń upraszczających na etapie tworzenia modeli,</li> <li>wiarygodność uzyskiwanych wyników zależy dodatkowo od zgodności z rzeczywistością wprowadzonych do modeli parametrów</li> </ul>

W zależności od potrzeb i możliwości, w biomechanice wykorzystuje się dwa zasadnicze podejścia do symulacji komputerowej: metodę **układów wielomasowych** i metodę **elementów skończonych** oraz metodę **hybrydową**

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE WIRTUALNE/SYMULACYJNE

### MUW — Metoda układów wielomasowych (*multibody system method*) (typowa liczba elementów rzędu kilkunastu — kilkuset)

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Krótki czas obliczeń</li> <li>Mała liczba parametrów modelu</li> <li>Parametry stosunkowo łatwe do określenia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Możliwe obliczenie tylko ograniczonej liczby wielkości charakteryzujących badany układ (np. można określić składowe sił reakcji w stawach, nie można rozkładu naprężeń)</li> <li>Stawy (w metodzie klasycznej, bez modyfikacji) reprezentowane w bardzo uproszczony sposób jako tzw. pary kinematyczne</li> </ul>



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE WIRTUALNE/SYMULACYJNE

**MES — Metoda elementów skończonych (*finite element method*)**  
(typowa liczba elementów — od kilkudziesięciu tysięcy do kilku milionów)

Zalety	Ograniczenia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Możliwość zbudowania bardzo złożonego modelu odwzorowującego wiernie cechy anatomiczne</li> <li>Możliwość uzyskanie bardzo szczegółowych wyników (np. map rozkładów naprężeń w stawach)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bardzo duża liczba danych, które należy wprowadzić do modelu, często trudnych do wyznaczenia (oszacowania)</li> <li>Bardzo długi czas obliczeń</li> </ul>



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



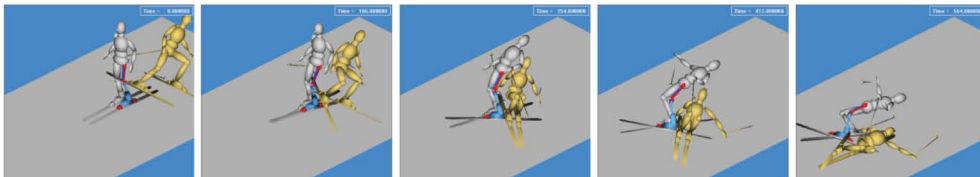
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELE WIRTUALNE/SYMULACYJNE

### Metoda hybrydowa: MES+MUW

- W zależności od potrzeb/celu badań, pewne segmenty ciała człowieka lub środowiska, w którym jego zachowanie jest analizowane, modelowane są przy wykorzystaniu MES, pozostałe MUW.
- Podejście takie pozwala na dostatecznie wiernie odwzorowanie analizowanego układu oraz uzyskanie dostatecznie szczegółowych wyników przy akceptowalnym czasie rozwiązań i ograniczonej liczbie (wymagających określenia na drodze eksperymentalnej) parametrów modelu.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



**Dziękuję za uwagę**



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T2. Przegląd podstawowych metod obliczeniowych wykorzystywanych w biomechanice

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



### Uwaga

- ❖ Niniejszy moduł: *T2. Przegląd podstawowych metod obliczeniowych wykorzystywanych w biomechanice*, zawiera powtórzenie, z niewielkimi uzupełnieniami/modyfikacjami, informacji zawartych w module: *T9. Zarys modelowania i symulacji komputerowej układu ruchu człowieka dla potrzeb ergonomii, medycyny i sportu*, oraz częściowo w module: *T10. Elementy biomechaniki pracy — projektowanie i ergonomia, ocena stanowisk pracy, z materiałów opracowanych przez autora do wykładu „Wprowadzenie do Biomechaniki” (WdB)*, Wyd. MEiL Politechniki Warszawskiej, 2015.
- ❖ Temat ten znalazł się wśród prezentowanych w ramach niniejszego wykładu, ponieważ jest istotny dla całości jego programu, a wśród słuchaczy mogą być studenci, którzy nie mieli możliwość wysłuchania wykładów z WdB.

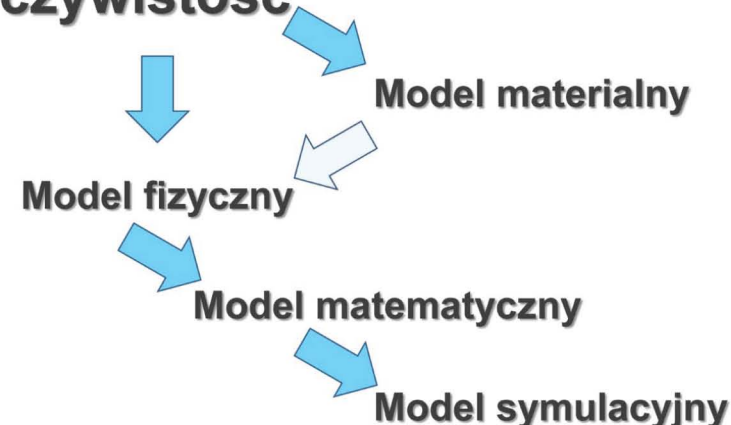
WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



### WSTĘP

## Rzeczywistość



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## METODY OBLICZENIOWE BIOMECHANIKI

### Wstęp

- ❖ Metodom wstępnej obróbki i przetwarzania danych pomiarowych poświęcony jest moduł *T3. Metody opracowania, analizy i agregowania danych z badań doświadczalnych i symulacyjnych*.
- ❖ Symulacja komputerowa odgrywa współcześnie bardzo ważną rolę we wszystkich obszarach badań naukowych i ich zastosowań.
- ❖ Istotnym czynnikiem, który wpłynął na rozwój metod symulacyjnych był obserwowany przez ostatnie pół wieku bardzo szybki rozwój mocy obliczeniowych komputerów, przy jednoczesnym spadku cen.
- ❖ Biomechanika (między innymi, ze względu na ograniczenia możliwości, zwłaszcza w niektórych jej gałęziach, wykorzystywania metod eksperymentalnych) jest jednym z tych obszarów, gdzie metody symulacyjne stosowane są powszechnie.
- ❖ Kolejne slajdy tego modułu przybliżają zagadnienie metod modelowania i zastosowań symulacji komputerowej w sporcie i medycynie i ergonomii.

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

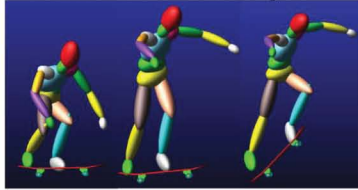
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



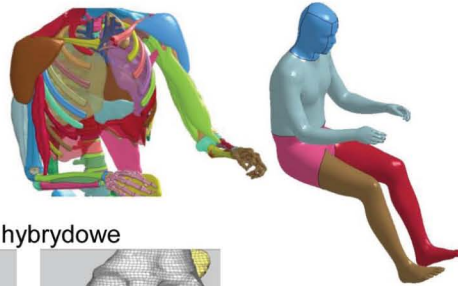
## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Metody symulacji komputerowej (metody wirtualne)

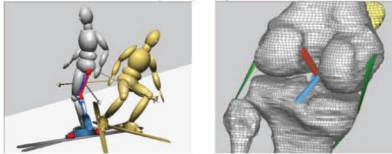
Metoda układów wieloczłonowych /układów wielomasowych



Metoda elementów skończonych



Metody hybrydowe



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ SPOŁECZNY

## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Sport

Metody symulacji komputerowej (metody wirtualne)

Metoda układów wieloczłonowych /układów wielomasowych

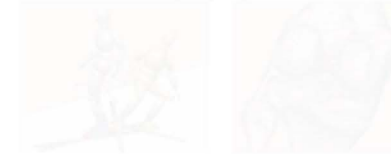


❖ Analiza elementów skończonych kinematograficzna

❖ Dynamika

- zadanie odwrotne
- zadanie proste

Metody hybrydowe



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ SPOŁECZNY

## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Sport

- ❖ Ruch ciała człowieka jest podstawą wszelkiej aktywności sportowej, stąd od początku swego rozwoju metody komputerowe znalazły zastosowanie w tej dziedzinie.
- ❖ Pierwsze modele były bardzo proste, pozwalały na symulowanie ruchu w dwóch wymiarach, ciało sportowca reprezentowane było przez kilka segmentów (model wieloczłonowy/wielomasowy), liczba uwzględnianych stopni swobody była rzędu kilku-kilkunastu.
- ❖ Dzisiejsze modele są zdecydowanie bardziej złożone, nie stanowi problemu rozwiązywanie zadań w przestrzeni 3D, liczba uwzględnianych stopni swobody jest również znacznie większa.
- ❖ Oprócz modeli wielomasowych, wykorzystuje się często, bardziej złożone modele symulacyjne, oparte na metodzie elementów skończonych.

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie

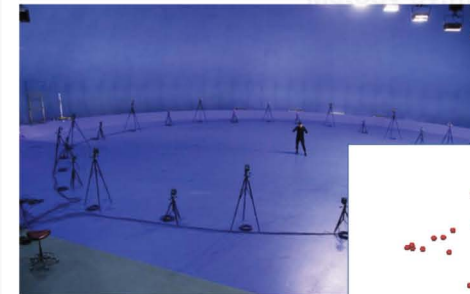


UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ SPOŁECZNY

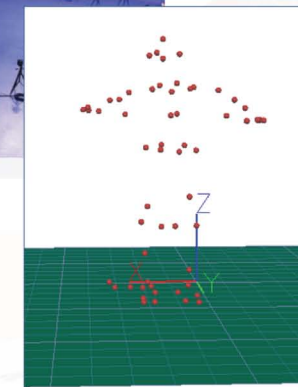
## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Sport

Metody symulacji komputerowej (metody wirtualne)



❖ Analiza elementów skończonych kinematograficzna



$$\left[ \begin{array}{l} [x_{ip}, y_{ip}, z_{ip}] \\ [\alpha_{xip}, \alpha_{yip}, \alpha_{zip}] \\ [v_{xip}, v_{yip}, v_{zip}] \\ [\omega_{xip}, \omega_{yip}, \omega_{zip}] \\ [a_{xip}, a_{yip}, a_{zip}] \\ [\varepsilon_{xip}, \varepsilon_{yip}, \varepsilon_{zip}] \end{array} \right]$$

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



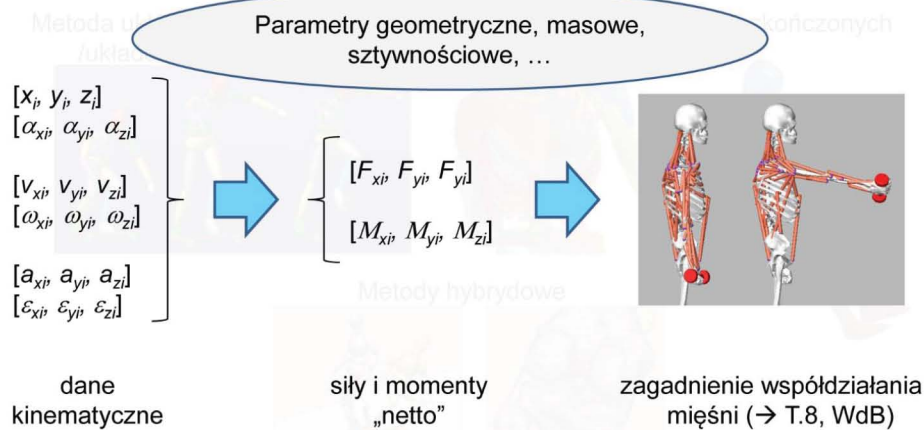
UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ SPOŁECZNY



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Sport

#### ❖ Dynamika — zadanie odwrotne



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



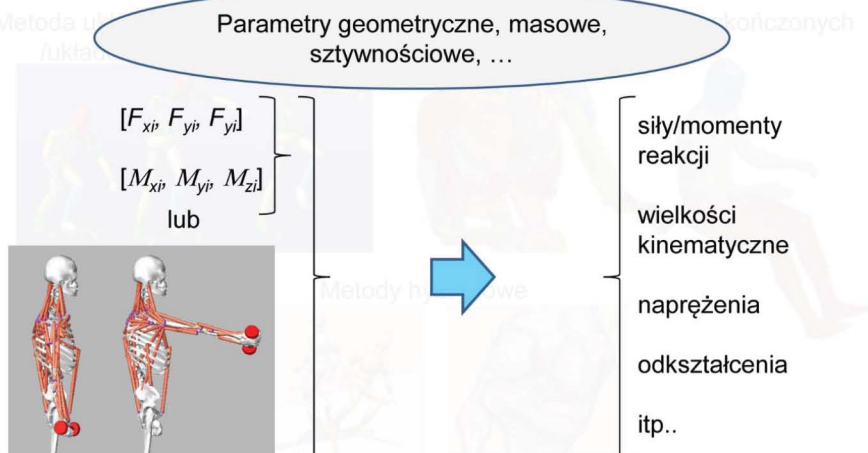
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Sport

#### ❖ Dynamika — zadanie proste



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



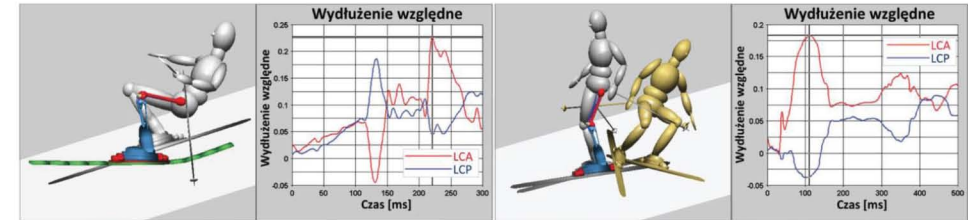
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



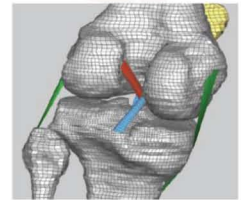
## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Sport

#### ❖ Dynamika — zadanie proste — model hybrydowy — przykład



LCA – więzadło krzyżowe przednie (lig. *cruciatum anterius*),  
LCP – więzadło krzyżowe tylne (lig. *cruciatum posterius*)



#### Ocena ryzyka powstania wybranych urazów stawu kolanowego w narciarstwie zjazdowym

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Analiza chodu w normie i patologii w celu leczenia i rehabilitacji osób niepełnosprawnych ruchowo
- ❖ Analiza przepływu krwi przez naturalne zastawki serca w celu prawidłowego zaprojektowania sztucznych
- ❖ Analiza obciążeń działających na układ kość-implant w celu dobrania odpowiedniego dla danego pacjenta implantu (np. sztucznego stawu) i zaprojektowaniu zabiegu jego wszczepienia
- ❖ Planowanie chirurgicznych procedur naprawczych w ortopedii
- ❖ Projektowanie implantów, protez i aparatów ortopedycznych (wspólnie z bioinżynierią i inżynierią ortopedyczną)
- ❖ ...

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

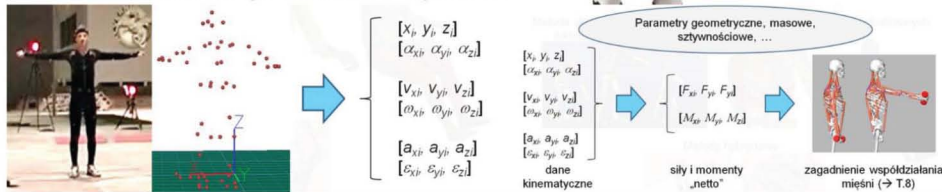
### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Analiza chodu w normie i patologii w celu leczenia i rehabilitacji osób niepełnosprawnych ruchowo:

- model ciała wieloczłonowy
- metoda kinematograficzna lub w wykorzystaniu zintegrowanych czujników „9D”
- + rejestracja sił kontaktu z podłożem



- zadania kinematyki i odwrotne dynamiki



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie

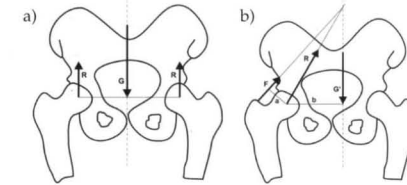


## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Analiza obciążeń działających na układ kość-implant w celu dobrania odpowiedniego dla danego pacjenta implantu (np. sztucznego stawu) i zaprojektowaniu zabiegu jego wszczepienia:

- metoda układów wieloczłonowych — analiza wstępna, określenie globalnych obciążeń (sił, momentów), linii działania sił, innych istotnych wielkości, w układzie pierwotnym i przewidywanych po wszczepieniu implantu



Rys. 8.39. Sposób wyznaczenia reakcji w stawie biodrowym wg modelu Pouwelsa podczas stania na a) obu kończynach:  $R$  – wypadkowa reakcja w stawie,  $G$  – ciężar ciała bez ciężaru obu kończyn, b) jednej kończynie:  $R$  – wypadkowa reakcja w stawie,  $F$  – siła generowana przez mięśnie odwodźciaciele,  $G'$  – ciężar ciała bez ciężaru kończyny, na której osoba stoi [5]

Źródło: Tejszerska D., Światoński E., Gzik M.: *Biomechanika narządu ruchu człowieka*, Wyd. Naukowe ITE – PIB, Radom, 2011

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



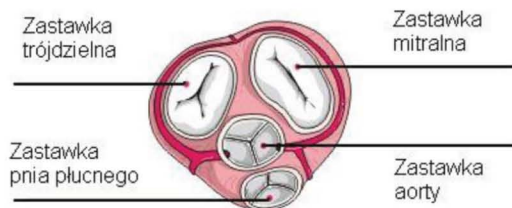
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Analiza przepływu krwi przez naturalne zastawki serca w celu prawidłowego zaprojektowania sztucznych:



- metoda elementów skończonych, różny stopień dokładności odwzorowania modelu płynu opisującego krew, jak też własności geometrycznych i materiałowych (modeli materiałowych) naczyń krwionośnych

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie

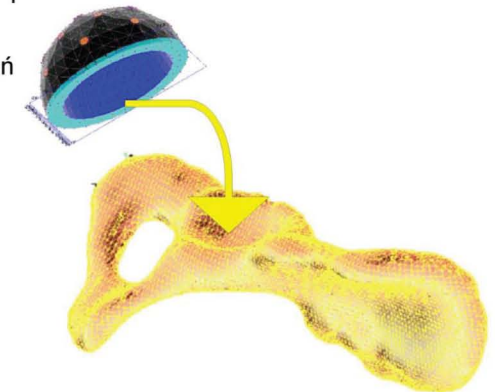


## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Analiza obciążeń działających na układ kość-implant w celu dobrania odpowiedniego dla danego pacjenta implantu (np. sztucznego stawu) i zaprojektowaniu zabiegu jego wszczepienia:

- metoda elementów skończonych — szczegółowa analiza oddziaływań (rozkładów naprężeń) w strefie kontaktu kość-implant; ocena skutków bezpośrednich interwencji chirurgicznej oraz przewidywanych skutków długoterminowych



Źródło: <http://www.imio.polsl.pl/przedmioty-zdij/aj-nmub21.jpg>

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



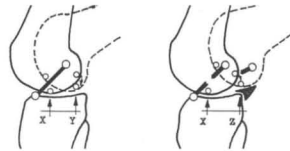
## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Planowanie chirurgicznych procedur naprawczych w ortopedii (np. korekta wad wrodzonych w rejonie stawów):



- metoda układów wieloczłonowych — analiza wstępna, określenie globalnych obciążeń (sił, momentów), linii działania sił, innych istotnych wielkości, w układzie pierwotnym i przewidywanych po interwencji chirurgicznej



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

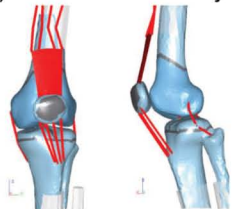
## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Planowanie chirurgicznych procedur naprawczych w ortopedii (np. korekta wad wrodzonych w rejonie stawów):



- metoda elementów skończonych — szczegółowa analiza (z wiernym odwzorowaniem geometrii) skutków interwencji chirurgicznej



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Zastosowania medyczne — typowe zadania

- ❖ Projektowanie implantów, protez i aparatów ortopedycznych (wspólnie z bioinżynierią i inżynierią ortopedyczną):



- metoda układów wieloczłonowych — analiza wstępna
- metoda elementów skończonych — analiza szczegółowa

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia

- ❖ **System SAMMIE** – przykład oprogramowania pozwalające na uwzględnienie w procesie projektowania stanowisk/środowiska pracy obecności człowieka z uwzględnieniem cech geometrycznych/antropometrycznych/kinematycznych (więcej informacji: <http://www.lboro.ac.uk/microsites/lds/sammie/home.htm>)
- ❖ Wykorzystanie systemu SAMMIE (i podobnych):
  - umożliwia uwzględnienie w procesie projektowania takich aspektów jak: zapewnienie wygodnego miejsca dla człowieka pracującego na danym stanowisku pracy, właściwej konfiguracji ciała, ograniczeń w zakresie zasięgu rąk, obszaru widzenia itp.,
  - umożliwia znajdowanie rozwiązań optymalnych zarówno pod względem wydajności pracy, jak też komfortu i bezpieczeństwa pracownika,
  - skraca czas projektowania, obniżając koszty.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

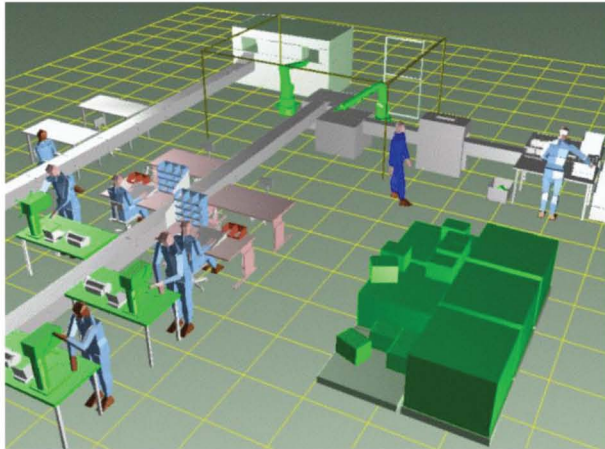
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia



<http://www.lboro.ac.uk/microsites/lbs/sammie/images/slide/imi80.gif>

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia

- ❖ Oprogramowanie **3D Static Strength Prediction Program™ (3D-SSPP)** (więcej informacji: <http://c4e.engin.umich.edu/tools-services/3dsspp-software/>) jest przykładem dość zaawansowanego narzędzia do prowadzenia analiz biomechanicznych obciążeń działających na poszczególne struktury ciała człowieka w różnych sytuacjach spotykanych na stanowiskach pracy przy uwzględnieniu cech osobniczych (wzrost, rozkład masy, postawa) oraz obciążeń zewnętrznych, jakim poddawany jest pracownik w sytuacjach, gdy obciążenia zewnętrzne mają charakter statyczny lub quasi-statyczny.
- ❖ Oprogramowanie w najnowszej wersji (6.\*.\*, rok 2015) posiada dość wygodny interfejs użytkownika pozwalający na stosunkowo proste definiowanie badanego scenariusza pracy (podstawowych parametrów biomechanicznych pracownika, płci, postawy, obciążeń zewnętrznych, ...) oraz wyprowadzanie i analizowanie wielu użytecznych informacji dotyczących obciążeń poszczególnych struktur ciała wraz z informacją o potencjalnych zagrożeniach dla zdrowia pracownika z uwzględnieniem rodzaju pracy (krótko-, długotrwała).

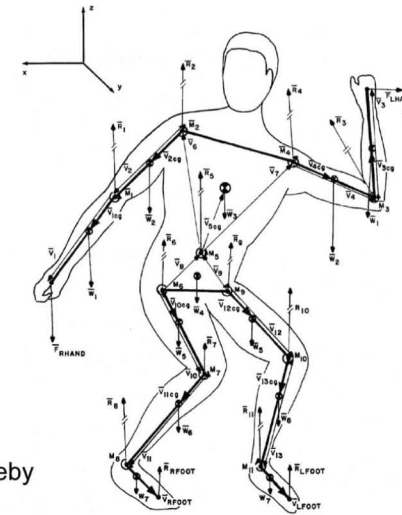
#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia



Model ciała człowieka wykorzystany na potrzeby programu 3D-SSPP

Źródło: 3D SSPP User's Manual, The University of Michigan Center for Ergonomics, 2014

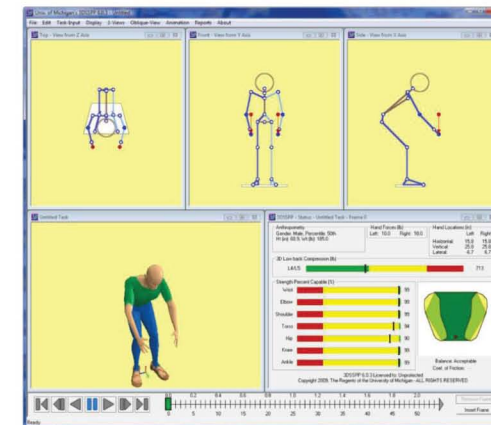
#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia



Główne okno programu 3D-SSPP

Źródło: 3D SSPP User's Manual, The University of Michigan Center for Ergonomics, 2014

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

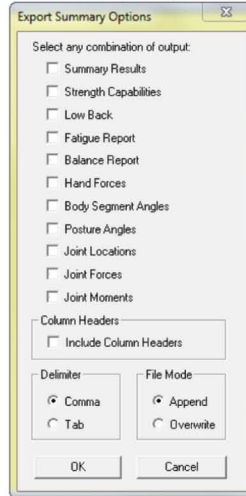
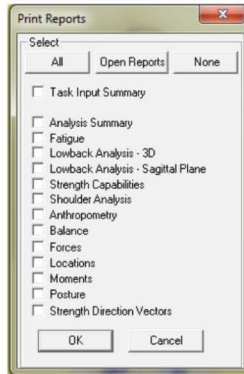
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia

Ustalenia zawartości raportu i danych wyjściowych z programu 3D-SSPP



Źródło: 3D SSPP User's Manual, The University of Michigan Center for Ergonomics, 2014

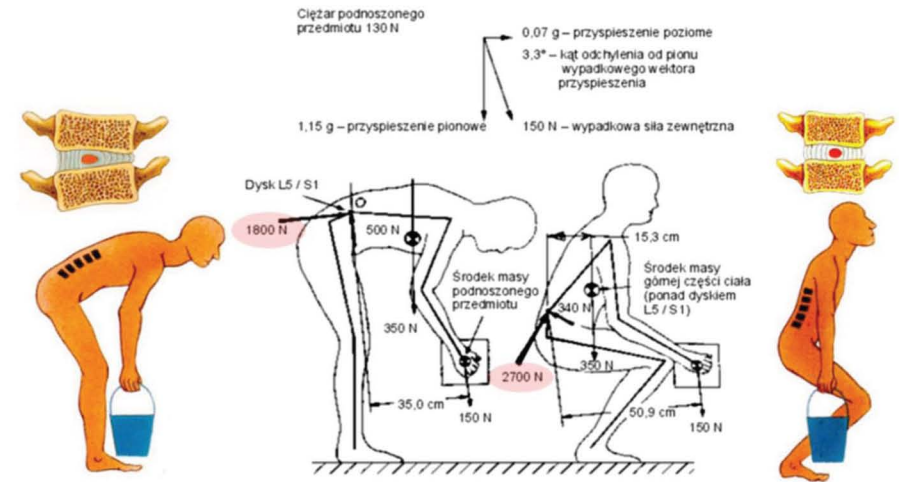
#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniary nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Potrzeba krytycznej oceny wyników analiz biomechanicznych



Na podstawie: Chaffin D.B., Andersson G.B.J. Occupational Biomechanics, JW&S, Inc. 1991

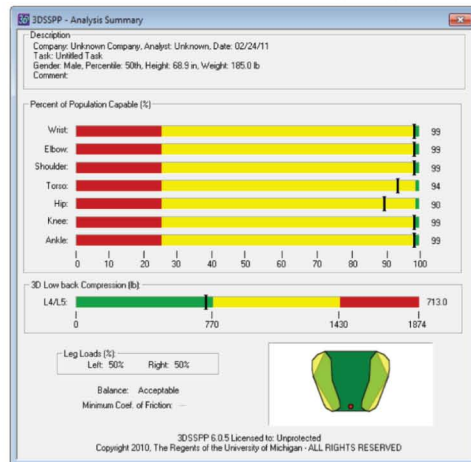
#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniary nieodpłatnie



## MODELOWANIE I SYMULACJA KOMPUTEROWA

### Projektowanie przestrzeni/stanowisk pracy — narzędzia



Podsumowanie analiz programu 3D-SSPP

Źródło: 3D SSPP User's Manual, The University of Michigan Center for Ergonomics, 2014

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniary nieodpłatnie



Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniary nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T3. Metody opracowania, analizy i agregowania danych z badań doświadczalnych i symulacyjnych

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Sygnal kontra zakłócenie (przykład - analiza chodu człowieka)

- ❖ Sygnal
  - współrzędna anatomiczna zmieniająca się w czasie
- ❖ Zakłócenie
  - określenie opisujące składową sygnału końcowego nie związanego z danym procesem (w tym przypadku z ruchem)
  - ma wiele źródeł i ma charakter losowy
- ❖ Zazwyczaj zakłócenia losowe mają wysoką częstotliwość (przykład – analiza harmoniczna ruchu markera znajdującego się na palcu stopy podczas chodu)

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Charakterystyka nieprzetworzonych danych obrazu

- ❖ Dane (obrazujące położenie markerów), pozyskane z filmu są danymi pierwotnymi (nieprzetworzonymi)
- ❖ Z danymi pierwotnymi związane są zakłócenia/szumy (pochodzące z wielu źródeł)
- ❖ Zakłócenia powodują losowe błędy w danych przetworzonych
- ❖ Aby zminimalizować te błędy stosuje się różne techniki „wygładzania” danych pierwotnych

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

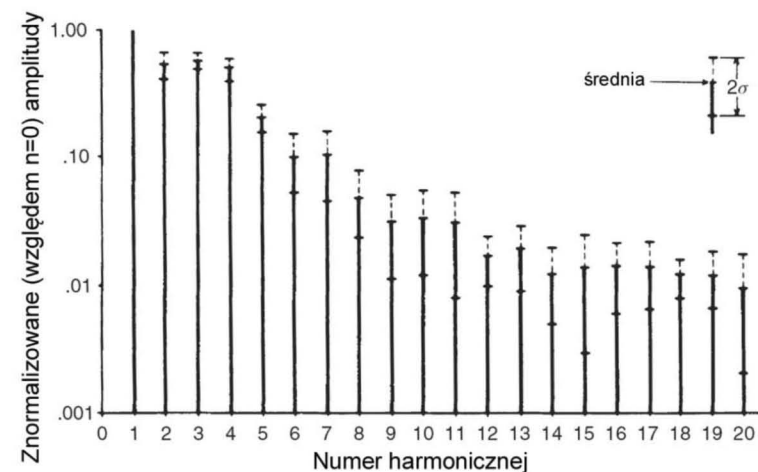


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Problemy obliczania prędkości i przyspieszeń

- ❖ Obecność zakłóceń o wysokiej częstotliwości ma duży wpływ na obliczanie poprawnych wartości prędkości i przyspieszeń
- ❖ Przyjmijmy, że sygnał może być opisany jako suma  $N$  harmonicznyc

$$x = \sum_{n=1}^N X_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n)$$

gdzie :

- $\omega_0$  = częstotliwość podstawowa
- $n$  = numer harmonicznej
- $X_n$  = amplituda  $n$ -tej harmonicznej
- $\theta_n$  = faza  $n$ -tej harmonicznej



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Problemy obliczania prędkości i przyspieszeń

- ❖ Aby uzyskać równanie opisujące prędkość w kierunku  $x$  różniczkujemy po czasie

$$V_x = \frac{dx}{dt} = \sum_{n=1}^N n\omega_0 X_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

- ❖ Podobnie postępujemy aby uzyskać równanie opisujące przyspieszenie

$$A_x \frac{dV_x}{dt} = - \sum_{n=1}^N (n\omega_0)^2 X_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n)$$

- ❖ Amplituda każdej harmonicznej zwiększa się wraz z jej numerem – liniowo w przypadku prędkości, proporcjonalnie do kwadratu numeru harmonicznej, w przypadku przyspieszenia

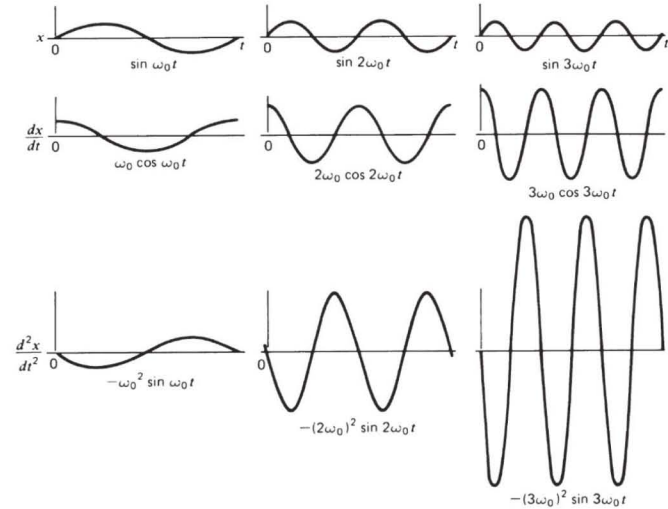


WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Techniki pozwalające wygładzać i dopasowywać dane do krzywej

- ❖ Założenie, że trajektoria (krzywa) sygnału jest określonego kształtu; dopasowanie danych pierwotnych do odpowiedniej, znanej trajektorii pozwoli na ich wygładzenie (pozbycia się szumów)
- ❖ Założenie, że tylko pewna liczba harmonicznyc występujących w sygnale ma znaczenie (technika wielomianów)
- ❖ Zmodyfikowana technika wielomianów: krzywa opisująca sygnał jest podzielona na sekcje (występują problemy obliczeniowe w punktach połączeń sekcji)
- ❖ Filtrowanie cyfrowe – najczęściej stosowana technika

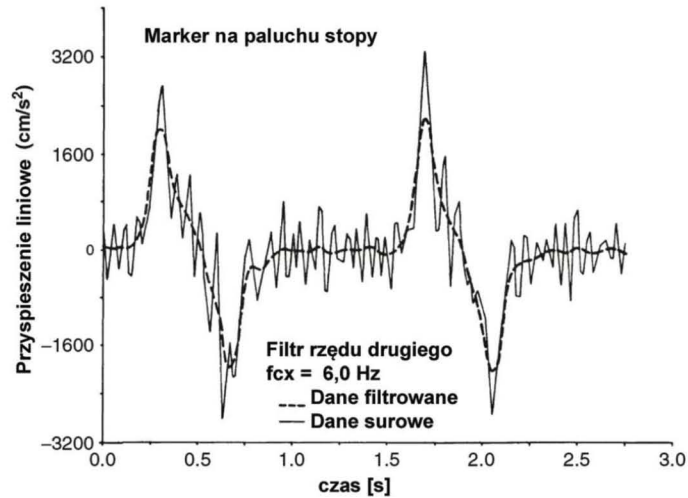


WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Filtrowanie cyfrowe sygnału – usunięcie opóźnienia fazowego filtra dolnoprzepustowego

- Format rekurencyjny filtra cyfrowego przetwarzający dane pierwotne (nieprzetworzone) w dziedzinie czasu

$$X^l(nT) = a_0X(nT) + a_1X(nT - T) + a_2X(nT - 2T) + b_1X^l(nT - T) + b_2X^l(nT - 2T)$$

gdzie:

$X^l$  = filtrowane współrzędne wyjściowe

$X$  = niefiltrowane współrzędne

$nT$  =  $n$ -ta próbka

.....

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

Wzór potrzebny do obliczenia pięciu współczynników filtra drugiego rzędu jest następujący

$$\omega_c = \frac{\tan(\pi f_c / f_s)}{C}$$

gdzie:

$C$  jest czynnikiem korekcyjnym zależnym od liczby wymaganych przejść (dla jednokrotnego przejścia  $C = 1$ )

$f_c$  częstotliwość odcięcia a  $f_s$  częstotliwość próbkowania

$$K_1 = \sqrt{2}\omega_c \quad \text{dla filtra Butterwortha}$$

or,  $2\omega_c$  dla filtra z tłumieniem krytycznym

$$K_2 = \omega_c^2, \quad a_0 = \frac{K_2}{(1 + K_1 + K_2)}, \quad a_1 = 2a_0, \quad a_2 = a_0$$

$$K_3 = \frac{2a_0}{K_2}, \quad b_1 = -2a_0 + K_3$$

$$b_2 = 1 - 2a_0 - K_3, \quad \text{or} \quad b_2 = 1 - a_0 - a_1 - a_2 - b_1$$

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

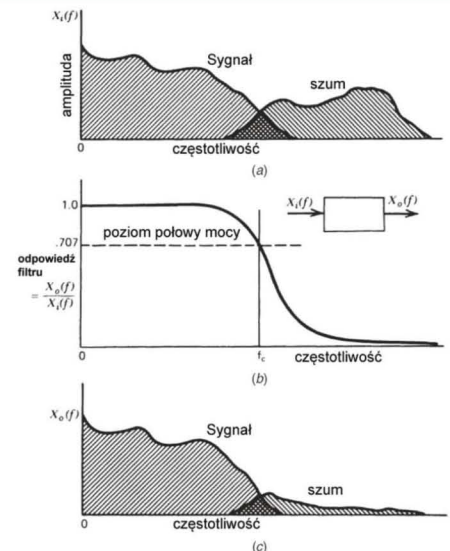


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Filtrowanie cyfrowe sygnału



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



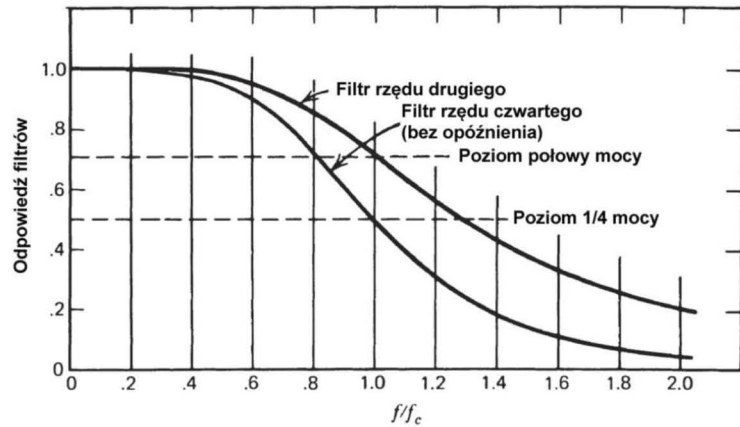
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie





## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Filtrowanie cyfrowe sygnału



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



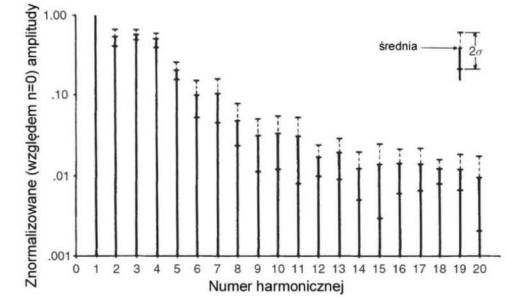
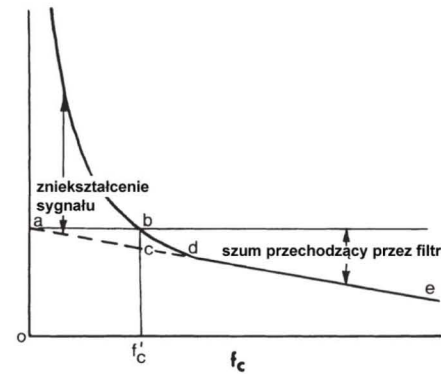
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Wybór częstotliwości granicznej

#### ❖ Analiza harmoniczna



#### ❖ Analiza resztkowa różnic pomiędzy przefiltrowanym oraz pierwotnym sygnałem w szerokim zakresie częstotliwości granicznych

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

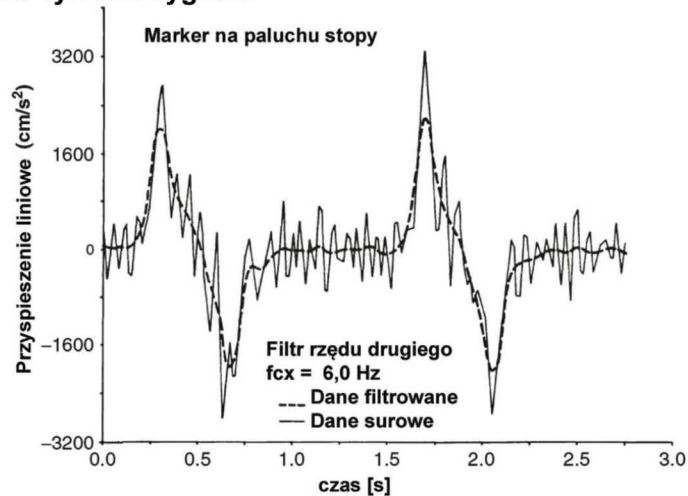


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Filtrowanie cyfrowe sygnału



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

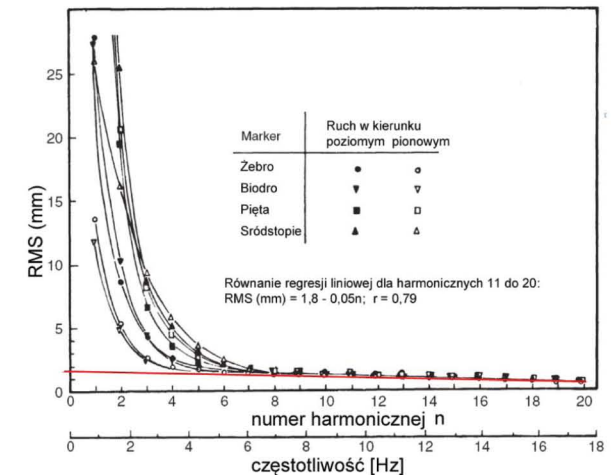


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Wybór częstotliwości granicznej



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Optymalna częstotliwość graniczna

- ❖ W 1999 Yu i in. przeprowadzili szczegółową analizę pozwalającą oszacować optymalną częstotliwość graniczną dla pochodnych wyższego rzędu (szczególnie przyspieszeń)
- ❖ Wg Yu i in. optymalna częstotliwość graniczna jest zależna zarówno od funkcji resztkowej między danymi przefiltrowanymi oraz pierwotnymi jak również od częstotliwości próbkowania  $f_s$

$$f_{c,2} = 0.06 f_s - 0.000022 f_s^2 + 5.95/\varepsilon$$

gdzie:  $f_s$  jest częstotliwością próbkowania a  $\varepsilon$  jest miarą względnej średniej funkcji resztkowej między danymi przefiltrowanymi oraz pierwotnymi:  $X_i$  i  $X_i'$



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Porównanie wybranych technik wygładzania sygnałów

- ❖ Źródła danych do porównań:
  - goniometr rejestrujący położenia kątowe
  - akcelerometr zamontowany na końcu ramienia wyznaczający przyspieszenie styczne (co pozwala na łatwe wyznaczenia przyspieszenia kąowego)
  - dane filmowe obrazujące położenie markerów



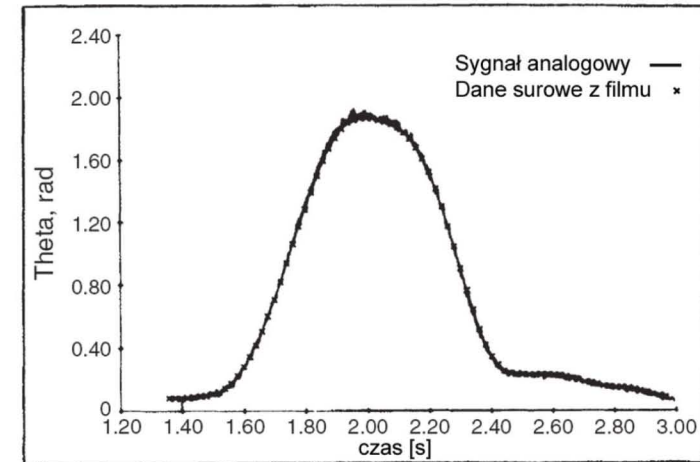
WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Porównanie wybranych technik wygładzania sygnałów



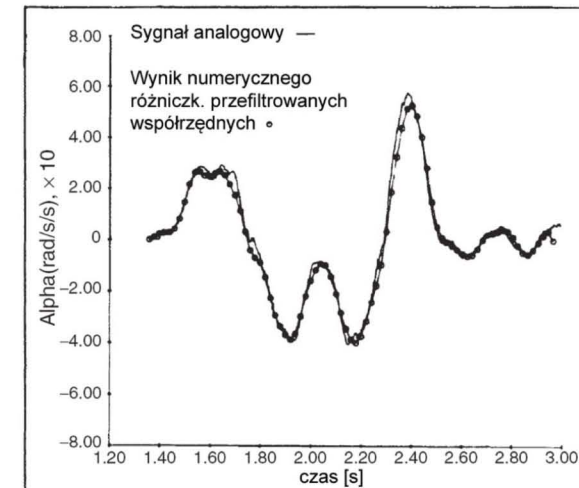
WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Porównanie wybranych technik wygładzania sygnałów



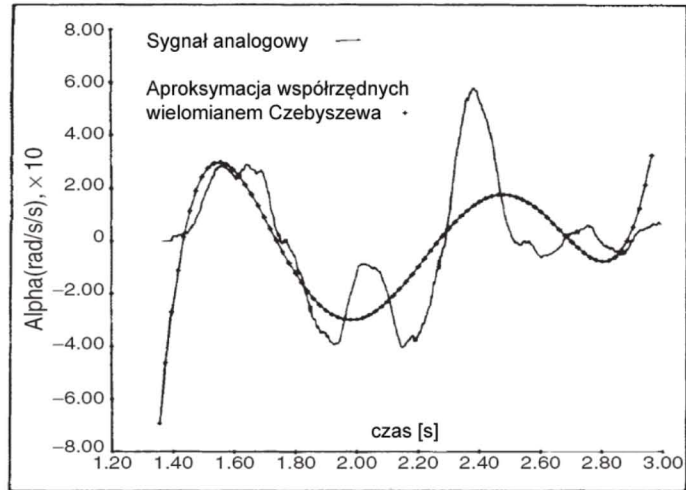
WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Porównanie wybranych technik wygładzania sygnałów



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

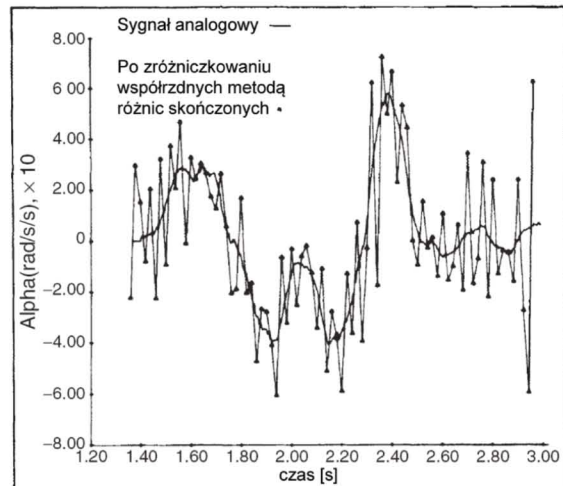


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Opracowanie i analiza danych kinematycznych

### Porównanie wybranych technik wygładzania sygnałów



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Uwagi końcowe, źródła, piśmiennictwo

- ❖ Podstawowe źródło wykorzystanych informacji i ilustracji:  
David A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement*, 4th ed.,  
John Wiley & Sons, Inc., 2009.

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T4. Metody porównywania wyników badań doświadczalnych i symulacyjnych — punktowe i oparte na przebiegach czasowych — wybranych wielkości fizycznych

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Dalsze rozważania przedstawiono na przykładzie rozwiązań opracowanych na potrzeby biomechaniki zderzeń, głównie w zastosowaniach do poprawy bezpieczeństwa kierowców i pasażerów pojazdów samochodowych oraz innych uczestników ruchu drogowego.

Zaprezentowane metody mogą jednak być łatwo zaadoptowane na potrzeby również innych gałęzi biomechaniki.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Układy biomechaniczne (w tym ciało człowieka, stanowiące najważniejszy obiekt badań biomechanicznych) charakteryzują się bardzo dużym stopniem komplikacji i znacznymi nieliniowościami.

Stąd do opisu tak kinematyki, jak też dynamiki konieczne jest wykorzystanie informacji, głównie z przebiegów w czasie, jednocześnie dla wielu wielkości fizycznych charakteryzujących analizowane scenariusze.

Sytuacja taka rodzi potrzebę posługiwania się odpowiednimi narzędziami, umożliwiającymi ocenę zgodności wyników uzyskiwanych w czasie badań doświadczalnych i symulacyjnych (np. na potrzeby oceny postępów treningu w biomechanice sportu, skuteczności zabezpieczeń mających na celu redukcję urazów w biomechanice pracy czy biomechanice zderzeń itp.).

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Wielkość obrażeń ciała kierowcy/pasażera zależy nie tylko od systemów bezpieczeństwa w jakie wyposażony jest pojazd — istotną rolę odgrywa przebieg (parametry) wypadku.

Ze względu na wielką różnorodność scenariuszy poszczególnych wypadków drogowych istnieje konieczność posługiwania się jednorodnymi, obiektywnymi kryteriami „podobieństwa” przebiegu wypadków, gdyż tylko dla wypadków „podobnych” ma sens porównywanie skuteczności zabezpieczeń oferowanych przez różne systemy bezpieczeństwa biernego przy ocenie ich wpływu na ryzyko obrażeń ich uczestników.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Wyróżnić można dwa zasadnicze typy obiektywnych kryteriów podobieństwa:

- ❖ kryteria wykorzystujące informacje „punktowe”,
- ❖ kryteria bazujące na analizie kompletnych przebiegów w czasie dla wybranych wielkości fizycznych charakteryzujących analizowane zjawisko (np. przebieg wypadku samochodowego).

Oddzielną grupę stanowią kryteria mające na celu ocenę zgodności zachowania się biomechanicznych modeli materialnych (np. manekinów samochodowych) lub symulacyjnych ciała człowieka poddanego obciążeniom, w stosunku do informacji zgromadzonej na podstawie badań przeprowadzonych z wykorzystaniem ochotników lub zwłok.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Ze względu na dużą różnorodność osobniczą w zakresie parametrów/wielkości biomechanicznych charakteryzujących ciało człowieka, trudno jest operować dokładnymi wartościami lub ściśle określonymi charakterystykami prezentującymi przebiegi określonych wielkości w funkcji czasu. Typowa informacja eksperymentalna może być przedstawiona tylko w postaci „korytarzy” prezentujących granice, w jakich mieściły się znane przebiegi z testów eksperymentalnych z wykorzystaniem ochotników lub zwłok.

W przypadku typowych przebiegów pojedynczych wielkości fizycznych w funkcji czasu „korytarze” te mogą być reprezentowane w postaci określonych obszarów na płaszczyźnie.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

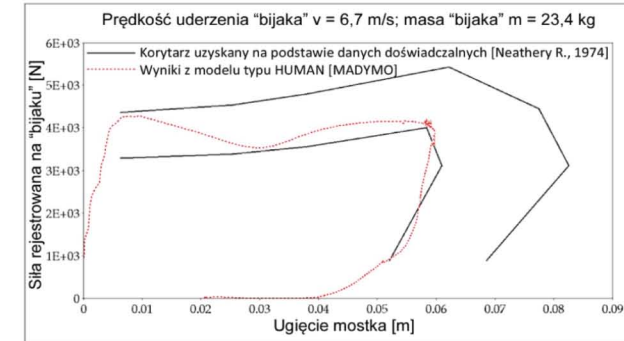
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Ocena zgodności przebiegów generowanych przez programy symulacyjne lub uzyskiwanych dla modeli materialnych (manekinów) polega na sprawdzeniu jaka część krzywych reprezentujących te przebiegi znajduje się wewnątrz „korytarza”.



Porównanie zależności ugięcia mostka i siły uderzenia rejestrowanej na „bijaku” dla modelu symulacyjnego MADYMO i wyników z doświadczeń z wykorzystaniem zwłok.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

### Kryteria wykorzystujące informacje „punktowe”

Podobieństwo określonych zdarzeń czy też ocena stopnia zagrożenia w różnych porównywanych przypadkach są określane na podstawie pojedynczych wartości liczbowych wyznaczanych dla poszczególnych zdarzeń.

Są to, bardzo często, wartości ekstremalne wybranych parametrów podlegających ocenie, takie jak maksymalne wartości przyspieszeń, sił czy momentów.

Istotną grupę z tej kategorii stanowią tzw. „biomechaniczne kryteria urazów/obrażeń/tolerancji”.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Należy tu zwrócić uwagę na istotne niebezpieczeństwa popełnienia błędu oceny, zwłaszcza gdy analiza dokonywana jest w sposób zautomatyzowany bez bezpośredniego udziału człowieka. Dotyczy to w szczególności przypadków, gdy część danych pozyskiwana jest z obliczeń symulacyjnych. Należy mieć pewność, że identyfikowane przez system wartości ekstremalne są rzeczywiście związane z badanym zjawiskiem. Może się bowiem zdarzyć, że są to chwilowe zaburzenia wywołana zupełnie innymi przyczynami.

W przypadku obliczeń symulacyjnych, do częstych błędów popełnianych przez mało doświadczonych badaczy należy brak zwrócenia należytej uwagi na fakt, czy model symulacyjny przed rozpoczęciem obliczeń znajduje się w równowadze. Niedokładności w zadaniu np. długości i przebiegu, w stosunku do ciała kierowcy, pasa bezpieczeństwa mogą skutkować pojawieniem się bardzo znacznych sił (wynikających z własności mechanicznych i geometrii) już w chwili „zero” symulacji, często znacznie przewyższających obciążenia wynikające z symulowanego zjawiska.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Podobne problemy mogą wystąpić w przypadku stawów człowieka, modelowanych nie jako klasyczna para kinematyczna opisana więzami geometrycznymi a jako struktura składająca się ze „swobodnych” kości, więzadeł i innych tkanek, utrzymywana w całości dzięki współdziałaniu sił „odpychających” w strefach kontaktu i sił „ściągających” zapewnianych przez aparat więzadłowy uzupełnianych przez siły oddziaływań mięśniowych (jeżeli takie są brane pod uwagę dla rozważanego modelu).

W celu rozwiązania wspomnianego wyżej problemu przeprowadza się proces, który można nazwać „symulacją wstępną” (w literaturze anglojęzycznej używa się terminu *pre-simulation*). Analizowany układ, ze wstępnie określoną geometrią, pozostawiany jest pod działaniem siły grawitacji i sił wewnętrznych wynikających ze wzajemnych oddziaływań poszczególnych elementów składowych, tak długo, aż ustali się w nim stan równowagi pomiędzy odkształceniami/deformacjami a siłami. Następnie wtedy jego „zamrożenie” i dopiero taka postać jest wykorzystywana do prowadzenia właściwych badań symulacyjnych, jako konfiguracja dla  $t=0$ .



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

### Kryteria bazujące na analizie kompletnych przebiegów w czasie wybranych wielkości fizycznych

W piśmiennictwie można znaleźć wiele propozycji metod oceny zgodności przebiegów w czasie, zarówno ogólnych, jak też przystosowanych szczególnie do analizy przebiegów typowych dla analizy zjawisk uderowych charakterystycznych dla wypadków komunikacyjnych.

Interesującą propozycję zestawu takich kryteriów umożliwiających zautomatyzowane, obiektywne, porównywanie wyników wypadków, testów eksperymentalnych i symulacji zaproponował Jacob i współautorzy [Jacob C., Charras F., Trosseille X, Hamon J., Pajon M., Lecoz J.Y.: *Mathematical Models Integral Rating, International Journal of Crashworthiness, Vol. 5, No.4, pp. 417-432, 2000*] — dalej przytoczono podstawowe wzory (1)+(13) definiujące główne kryteria w ich oryginalnej postaci. Numeracja wzorów jest zgodna z pracą [Rzymkowski C.: *Modelowanie i symulacja procesów uderowych w biomechanice, Prace Naukowe – Mechanika, z. 262, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013.* ]



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

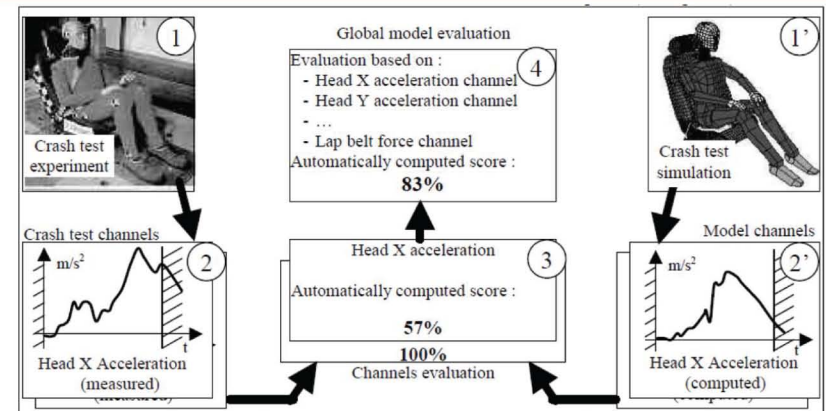
### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji



Schemat oceny zgodności wyników doświadczalnych i symulacyjnych na przykładzie badań z zakresu bezpieczeństwa biernego użytkowników samochodów: na podstawie odpowiadających sobie przebiegów wybranych wielkości fizycznych (2) i (2') z badań doświadczalnych (1) i symulacji (1') obliczane są miary podobieństwa cząstkowe (3) – dla poszczególnych sygnałów, a następnie globalna miara podobieństwa (4).



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

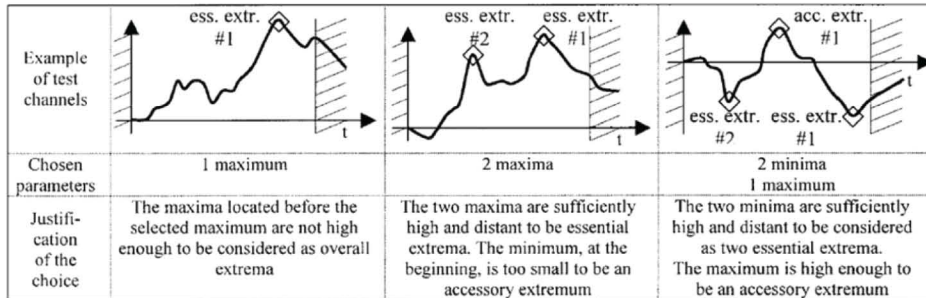
### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji



Przykład wyboru charakterystyk punktowych. Dla przypadku przedstawionego na ilustracji powyżej są to wartości ekstremalne (maksymalne i minimalne) przebiegów czasowych wielkości fizycznych wybranych do analizy/porównań. Liczbę takich parametrów określa się na podstawie znajomości badanego zjawiska (w większości przypadków przyjmuje się nie więcej niż 2+2).

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Time\_Score_{Overall\_Extremum} = \left( 1 - \frac{|Time_{Overall\_Test\_Extremum} - Time_{Overall\_Model\_Extremum}|}{Reference\_Period} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

gdzie:

$Time\_Score$  – miara zgodności wystąpienia pewnych cech charakterystycznych (określanych nazwą występującą w indeksie dolnym) analizowanego przebiegu określonej wielkości fizycznej, ze względu na czas, w którym dana cecha się ujawnia (w przypadku powyższego wzoru jest to moment, w którym w przebiegu występuje główne ekstremum –  $Overall\_Extremum$ );

$Time_{xxx}$  – czas wystąpienia cechy określonej informacją w indeksie ( $xxx$ );

$Overall\_Extremum$  – wartość ekstremalna (maksymalna lub minimalna) występująca dla całego analizowanego przebiegu; dodatkowy fragment identyfikatora  $Test$  lub  $Model$  określa, do którego z dwóch porównywanych przebiegów dana wielkość się odnosi (przyjęto, że  $Test$  odpowiada przebiegowi referencyjnemu,  $Model$  – temu, który do przebiegu referencyjnego jest porównywany);

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Reference\_Period = \rightarrow \eta \times Evaluation\_Period \quad (2.1)$$

gdzie:

$Reference\_Period$  – czas, dla którego sygnał zawiera istotne dla danego przypadku informacje (dla typowego wypadku, poza przypadkami zderzeń wielokrotnych i typu „roll-over”, czas ten nie przekracza 200 ms);

$Evaluation\_Period$  – czas, dla którego istnieje zapis przebiegów branych pod uwagę parametrów (zarejestrowanych dla wypadku lub testu eksperymentalnego lub wygenerowanych przez program symulacyjny);

$\eta$  – współczynnik określający udział  $Reference\_Period$  w  $Evaluation\_Period$  (dla typowych przypadków „crash-testów” samochodowych przebieg zderzenia rejestrowany jest przez ok. 400 ms, wtedy przyjmuje się zwykle  $\eta = 0,4$ );

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Value\_Score_{Overall\_extremum} = \left( 1 - \frac{|Value_{Overall\_Test\_Extremum} - Value_{Overall\_Model\_Extremum}|}{|Value_{Overall\_Test\_Extremum}|} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

gdzie:

$Value\_Score$  – miara zgodności wystąpienia pewnych cech charakterystycznych (określanych nazwą występującą w indeksie dolnym) analizowanego przebiegu określonej wielkości fizycznej, ze względu na wartość danej cechy (w przypadku powyższego wzoru jest to wartość głównego ekstremum –  $Overall\_Extremum$ );

$Value_{xxx}$  – wartość danej cechy określonej informacją w indeksie ( $xxx$ );

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Time\_Score_{Local\_Extremum} = \left( 1 - \frac{|Time_{Local\_Test\_Extremum} - Time_{Local\_Model\_Extremum}|}{Reference\_Period} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

gdzie:

$Local\_Extremum$  – formuła (2.4) jest odpowiednikiem (2.2), tyle że dla ekstremum lokalnego(ych) po przefiltrowaniu sygnału filtrem dolnoprzepustowym Butterwortha [98] o częstotliwości odcięcia 40 Hz. Oprócz ekstremum głównego (dwóch ekstremów głównych, w przypadku gdy występują dwie wartości o dużym module) analizowane są „miary podobieństwa” dotyczące jednego lub dwóch (jeżeli występują w przefiltrowanym sygnale) ekstremów lokalnych; o tym, czy daną wartość spełniającą formalnie kryterium ekstremum (zmiana znaku pochodnej) należy uwzględnić w analizie, jako ekstremum lokalne decyduje wprowadzana jako parametr analizy wartość procentowa sygnału (odniesiona do wartości ekstremum głównego);



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Time\_Score_{Edge} = \left( 1 - \frac{|Time_{Test\_Edge} - Time_{Model\_Edge}|}{Reference\_Period} \right) \times 100\% \quad (2.5)$$

gdzie:

$Time\_Score_{Edge}$  – miara zgodności w czasie wystąpienia maksymalnej wartości gradientu (spadku lub wzrostu) dla sygnału przefiltrowanego filtrem dolnoprzepustowym 40 Hz;

$$Value\_Score_{Edge} = \left( 1 - \frac{\min(Slope_{Test}, Slope_{Model})}{\max(Slope_{Test}, Slope_{Model})} \right) \times 100\% \quad (2.6)$$

gdzie:

$Time\_Score_{Edge}$  – miara zgodności pod względem wartości maksymalnych gradientów (spadku lub wzrostu) dla sygnałów  $Test$  ( $Slope_{Test}$ ) i  $Model$  ( $Slope_{Model}$ ) przefiltrowanych filtrem dolnoprzepustowym 40 Hz;

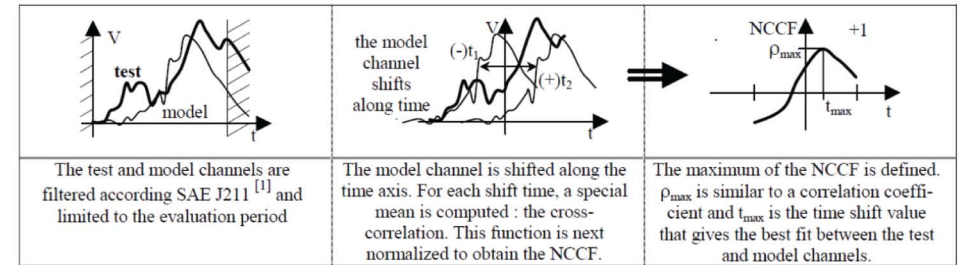


WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji



Przykład obliczania funkcji korelacji wzajemnej dwóch sygnałów, charakteryzującej globalne podobieństwo dwóch przebiegów oraz stanowiącej podstawę do wyznaczenia przesunięcia w czasie („zgranie zer”) porównywanych sygnałów.

Potrzeba „korekty zera” występuje np. przy porównywaniu obciążeń działających na ciała kierowców/pasażerów samochodów o różnej budowie przedniej części, uczestniczących w zderzeniu czołowym (oddziaływania na ciało człowieka „będą odczuwane” w różnym czasie od chwili rozpoczęcia kolizji i dlatego przed rozpoczęciem obliczania szczegółowych miar podobieństwa wybranych sygnałów należy „uzgodnić położenie zer” – w przeciwnym przypadku wskaźniki typu  $Time\_Score_{...}$  będą „przekłamane”).



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Time\_Score_{NCCF} = \left( 1 - \frac{|T_{Max}|}{Reference\_Period} \right) \times 100\% \quad (2.7)$$

gdzie:

$NCCF$  – indeks  $NCCF$  pochodzi o *Normalized Cross-Correlation Function* i oznacza w tym przypadku wielkość przesunięcia w czasie sygnału  $Model$  względem  $Test$ , zapewniającego uzyskanie największej wartości funkcji korelacji wzajemnej tych dwóch sygnałów  $\rho_{Max}$ ;

$$Value\_Score_{NCCF} = \rho_{Max} \times 100\% \quad (2.8)$$

gdzie:

$Value\_Score_{NCCF}$  – miara zgodności przebiegów, których położenie w czasie zostało skorygowane na podstawie funkcji korelacji wzajemnej;



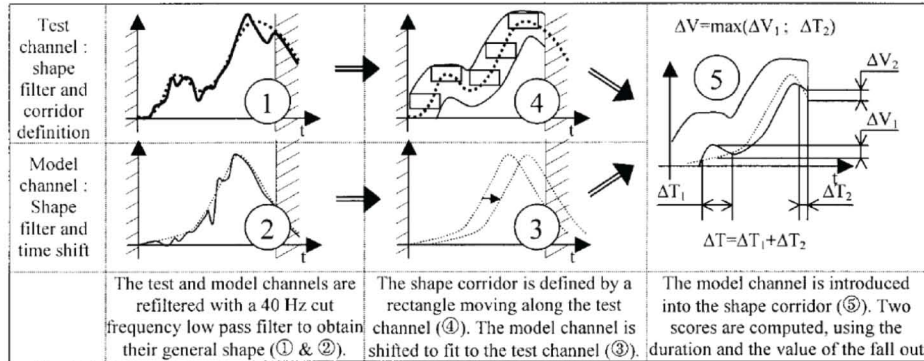
WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie





## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji



Przykład obliczania miary „zmisszczenia się” przebiegów konkretnych analizowanych wielkości fizycznych w „korytarzu” (wynikającym np. z uogólnienia danych uzyskanych przez wielu badaczy dla podobnych scenariuszy, przepisów homologacyjnych itp.).

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Value\_Score_{Shape\_Corridor} = \left( 1 - \frac{\max(|\Delta V_i|)}{\max(|Refiltred\_Test\_Channel|)} \right) \times 100\% \quad (2.10)$$

gdzie:

$\Sigma \Delta V_i$  – maksymalna wartość przekroczeń korytarza przez sygnał *Model* poza korytarzem wyznaczonym względem sygnału *Test*; pozostałe uwagi jak dla wzoru (2.9);

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

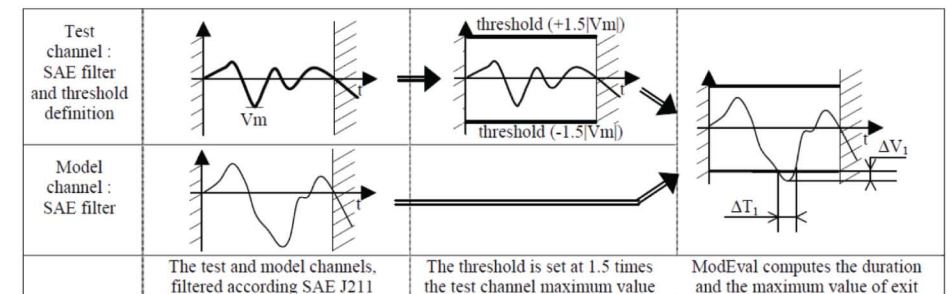
$$Time\_Score_{Shape\_Corridor} = \left( 1 - \frac{\sum \Delta T_i}{Evaluation\_Period} \right) \times 100\% \quad (2.9)$$

gdzie:

$\Sigma \Delta T_i$  – łączny czas, przez który sygnał *Model* przefiltrowany za pomocą filtra dolnoprzepustowego 40 Hz znajduje się poza korytarzem wyznaczonym względem podobnie przefiltrowanego sygnału *Test*, który to korytarz jest „wykreślony” przez poruszający się wzdłuż przebiegu *Test* prostokąt o wysokości równej 5% wartości maksymalnej tego (*Test*) sygnału i 5% *Reference\_Period*;

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

### TEM – Threshold Evaluation Method



Przykład obliczania miary „zmisszczenia się” przebiegów wartości konkretnych analizowanych wielkości fizycznych oraz czasów występowania ich pewnych cech charakterystycznych w określonych przedziałach.

## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Time\_Score_{TEM} = \left( 1 - \frac{\sum \Delta T_i}{Reference\_Period} \right) \times 100\% \quad (2.11)$$

$$Value\_Score_{TEM} = \left( 1 - \frac{\max(|\Delta V_i|)}{\max(|Thresholds\_Value|)} \right) \times 100\% \quad (2.12)$$

Podobnie jak dla (2.9) i (2.10), z taką różnicą, że kształt korytarza jest zdeterminowany (wynikający z przyjętych norm lub wprowadzany jako dane do analizy) – nie wynika z przebiegu sygnału *Test*:



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

$$Score_{CEM} = \left( 1 - \frac{|Test\_Criterion\_Value - Model\_Criterion\_Value|}{|Test\_Criterion\_Value|} \right) \times 100\% \quad (2.13)$$

Jest to właściwie kryterium „punktowe”, służące do oceny zgodności np. biomechanicznych kryteriów obrażeń (reprezentowanych przez pojedyncze liczby) wyznaczonych dla przebiegów *Test* i *Model*.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Poniżej przedstawiono przykład oceny (przy wykorzystaniu wspomnianego wyżej własnego programu) stopnia ochrony zapewniającej przez bardzo mały (masa całkowita w czasie testu: 992 kg) pojazd miejski – Mercedes SMART, w stosunku do ochrony oferowanej przez znacznie większe auto (masa całkowita w czasie testu: 1835 kg) klasy C tego samego producenta – Mercedes C230. W testach konsumenckich obydwa pojazdy były oceniane jako zapewniające porównywalną, DOBRĄ, ochronę dla kierowcy/pasażera. Warunki testów, przeprowadzonych przez amerykańską NHTSA, były bardzo zbliżone, różnica prędkości w momencie uderzenia w sztywną barierę nie przekraczała 1%.

Na rysunku 2.3 pokazano widok pojazdów przed przeprowadzeniem testu i po przeprowadzeniu. Ocena wizualna pozwala na stwierdzenie, że w jednym i drugim przypadku kabina została zachowana w dobrym stanie.

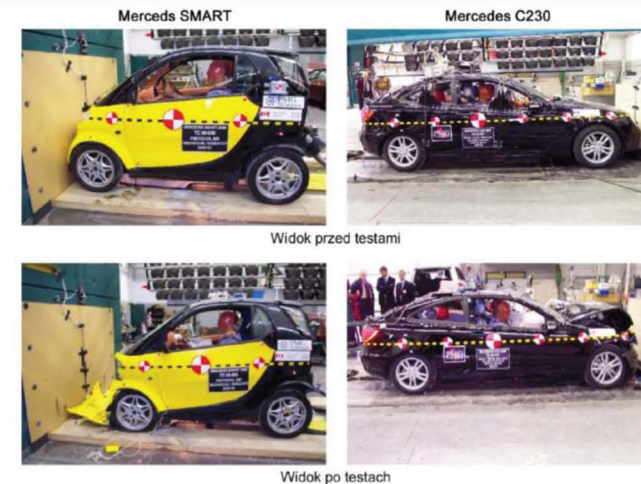


WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji



Rys. 2.3. Widok rozważanych samochodów przed testami (wg [72]) i po testach (wg [71]). Warunki testu: zderzenie czołowe ze sztywną płaską barierą, z prędkością 47,96 km/h dla samochodu Mercedes SMART i 47,60 km/h dla samochodu Mercedes C230



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Oprócz kryteriów cząstkowych na rysunkach 2.5 i 2.6 przedstawiono również informacje zbiorcze dotyczące ocen łącznych zgodności dla poszczególnych kryteriów, a także ocenę ogólną („Global Score”), która wyniosła 87,64%, co może być uznane za bardzo dobre potwierdzenie, że zarówno mały Mercedes SMART, jak też znacznie większy (ok. 2-krotnie większa masa) model Mercedes C230, oferują podobny stopień ochrony dla kierowcy<sup>4</sup>. W tym porównaniu 100% oznacza zgodność absolutną.

Wartość 0 oznacza, iż jednej z poszukiwanych cech nie zidentyfikowano w sygnale „Test” albo „Model”, np. dla wskaźnika  $Time\_Score_{Overall\_Extremum}(+)_{1}$  dla sygnału MS\_MC\_gr największa wartość dodatnia dla sygnału „Model” jest mniejsza niż graniczne 10% maksymalnego modułu tego sygnału i stąd przyjmuje się, że maksimum globalne nie występuje, natomiast dla sygnału „Test” (pełniącego funkcję sygnału „referencyjnego”) jest większa od tej wartości granicznej – stąd ocena 0.

Brak danej cechy w obu porównywanych sygnałach (np.  $Time\_Score_{Overall\_Extremum}(+)_{2}$  dla sygnału MS\_MC\_gr) klasyfikowany jest jako pełna zgodność, której przypisuje się ocenę 100.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Ocena zgodności wyników pomiarów i symulacji

Kryteria "podobieństwa"	Przyspieszenia środka masy głowy				Przyspieszenia środka masy klatki piersiowej				Siły wzdłużne w kościach udowych		Ocena łączna: głowa, klatka p., nogi
	MS_MC_gr	MS_MC_gy	MS_MC_gz	MS_MC_gr	MS_MC_kx	MS_MC_ky	MS_MC_kz	MS_MC_kr	MS_MC_rl	MS_MC_rp	MS_MC_gr_kr_nl_np
Time_Score_Overall_Extremum(+)1	0,00	86,50	83,25	89,75	0,00	85,43	91,75	82,12	88,50	100,00	90,09
Time_Score_Overall_Extremum(+)2	100,00	82,87	84,31	93,31	100,00	86,31	94,44	85,81	0,00	100,00	69,78
Time_Score_Overall_Extremum(-)1	89,37	62,80	86,25	100,00	82,18	87,25	71,62	100,00	87,56	88,62	94,05
Time_Score_Overall_Extremum(-)2	89,66	71,74	88,99	100,00	85,81	72,56	77,06	100,00	86,75	95,31	95,51
Value_Score_Overall_Extremum(+)1	0,00	43,64	94,87	98,97	0,00	72,56	82,10	99,21	93,25	100,00	97,86
Value_Score_Overall_Extremum(+)2	100,00	39,82	77,93	91,93	100,00	69,63	95,89	96,83	0,00	100,00	72,19
Value_Score_Overall_Extremum(-)1	98,42	40,37	55,97	100,00	97,06	94,48	97,43	100,00	96,60	65,48	90,52
Value_Score_Overall_Extremum(-)2	26,01	28,47	51,94	100,00	98,92	93,17	78,85	100,00	79,38	73,46	88,21
Time_Score_Edge	94,60	59,18	92,31	94,44	79,93	96,25	75,62	80,12	87,87	92,31	88,68
Value_Score_Edge	74,96	13,64	10,83	75,28	28,05	43,13	82,40	27,68	90,89	61,24	63,77
Time_Score_NCCF	91,19	29,67	26,73	91,94	88,87	93,37	73,81	88,68	87,93	89,43	89,50
Value_Score_NCCF	92,67	28,44	60,32	94,83	97,38	33,66	66,36	97,52	92,27	87,87	93,12
Time_Score_Shape_Corridor	88,88	36,38	33,33	69,98	84,08	77,53	71,08	84,83	86,93	93,78	83,88
Value_Score_Shape_Corridor	85,73	15,67	45,72	84,38	96,32	22,24	38,90	96,06	92,12	69,80	85,60
Time_Score_TEM	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,56	99,89
Value_Score_TEM	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,19	99,55
Score_CEM_HIC	79,63	69,37	43,76	77,19	96,83	0,00	42,00	95,38	81,19	61,88	
Score_CEM_CON3ms	99,44	87,44	77,81	99,77	98,71	50,78	69,44	98,18	97,41	68,79	
	Global_Score:										87,64

Rys. 2.5. Przykład zestawienia tabelarycznego wyników oceny dokonanej za pomocą oprogramowania opracowanego na podstawie metod zaproponowanych w pracy Jacoba i współautorów [44]. Wartość 100 oznacza pełną zgodność dla danego kryterium i dla danego sygnału dla obydwu samochodów. Oznaczenia zgodne z przyjętymi przy opisie wzorów (1)–(13)



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## Uwagi końcowe, źródła, piśmiennictwo

### Materiały źródłowe:

- ❖ Jacob C., Charras F., Trosseille X, Hamon J., Pajon M., Lecoz J.Y.: Mathematical Models Integral Rating, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 5, No.4, pp. 417-432, 2000.
- ❖ Rzymkowski C.: Modelowanie i symulacja procesów udarowych w biomechanice, *Prace Naukowe – Mechanika*, z. 262, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T5. Metody symulacyjne jako narzędzie porządkowania i uogólniania wyników badań doświadczalnych

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## WSTĘP

- ❖ Jednak przestrzeganie odpowiednich „zasad bezpieczeństwa”, przeprowadzanie prawidłowej walidacji modeli, zachowanie należytej staranności przy zbieraniu i odpowiednim wstępnym przygotowaniu danych wejściowych, sprawia, że jest to bardzo użyteczne narzędzie, nie tylko na potrzeby badań naukowych.
- ❖ Do zalet metod komputerowych, należą między innymi:
  - możliwość oceny projektowania/planowania nowych rozwiązań, np:
    - w zakresie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, takich jak systemy mające na celu poprawę bezpieczeństwa w środkach transportu lub na stanowiskach pracy,
    - w zakresie nowych metod treningowych w sporcie lub rehabilitacji,
    - w zakresie planowania zabiegów chirurgicznych (ortopedia, kardiochirurgia itp.);
  - możliwość wyznaczania wielkości, których bezpośredni pomiar w badaniach doświadczalnych jest niemożliwy/bardzo trudny lub kosztowny (np. określenie sił wewnętrznych w układzie mięśniowo-szkieletowym człowieka),
  - możliwość wykorzystania metod symulacyjnych do uogólniania „skalowania” i „personalizacji” wyników uzyskiwanych z badań doświadczalnych.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## WSTĘP

- ❖ Możliwości, jakie w ostatnich latach stworzył bardzo szybki rozwój mocy obliczeniowej komputerów oraz rozwój metod numerycznych sprawiły, że symulacja komputerowa (wykorzystanie modeli wirtualnych) staje się coraz częściej metodą „z wyboru” również dla rozwiązywania zadań z zakresu biomechaniki.
- ❖ Mimo licznych zalet, metody obliczeniowe/wirtualne posiadają też ograniczenia i wady.
- ❖ Do istotnych wad należą, m.in.:
  - konieczność wprowadzania wielu założeń upraszczających na etapie tworzenia modeli,
  - wiarygodność uzyskiwanych wyników zależy od zgodności z rzeczywistością wprowadzonych do modeli parametrów.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## WSTĘP

- ❖ Możliwość wykorzystania metod obliczeniowych do uogólnienia i „skalowania” wyników uzyskiwanych z badań doświadczalnych jest szczególnie cenna w tych obszarach biomechaniki, gdzie badania eksperymentalne są (bardzo)kosztowne lub niebezpieczne dla badanych „obiektów”.
- ❖ Obszarem biomechaniki, gdzie jest to szczególnie widoczne, jest biomechanika zderzeń/urazów.
- ❖ Ponieważ eksperymenty w warunkach rzeczywistych są zbyt niebezpieczne, istnieje konieczność prowadzenia (wzajemnie się uzupełniających) badań z wykorzystaniem modeli, w postaci: zwierząt, zwłok (PMHS), ochetników i modeli materialnych (→ schemat na następnym slajdzie).
- ❖ Dla każdego z tych modeli możliwe jest przeprowadzenie eksperymentów w innym zakresie obciążeń i uzyskanie wyników różnego typu.
- ❖ Idealnym uzupełnieniem są tu metody obliczeniowe/symulacyjne z modelami wirtualnymi walidowanymi w różnym zakresie, dzięki wykorzystaniu badań doświadczalnych wymienionych wyżej.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

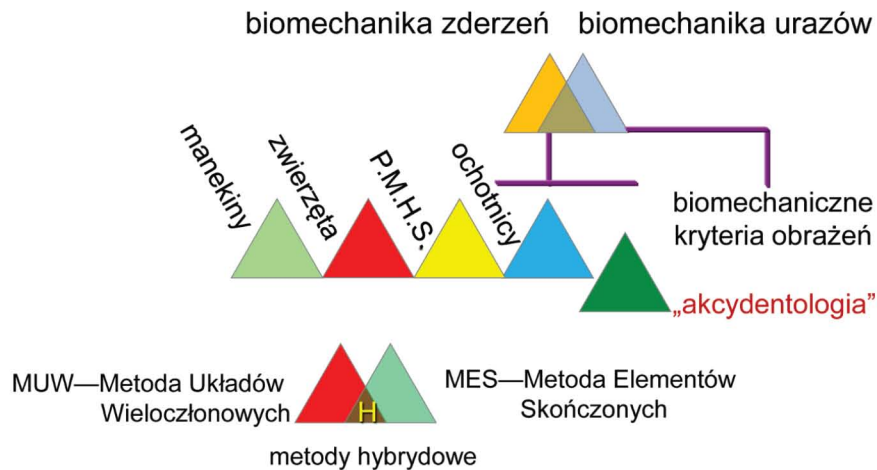


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## WSTĘP

### Źródła pozyskiwania informacji w biomechanice zderzeń/urazów



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## WSTĘP

- ❖ Dobrym przykładem obrazującym zastosowanie metod wirtualnych, jest ich wykorzystanie do oceny stopnia ochrony, zapewnianego przez zgodne z obowiązującymi przepisami, standardowe systemy bezpieczeństwa w jakie wyposażone są, współczesne samochody (testowane dla typowych użytkowników — pełnosprawnych, 5-, 50 i 95-centylowych), w przypadku użytkowników nietypowych (np. nieproporcjonalnej budowie ciała, z paraliżem lub amputacjami kości itp.).
- ❖ Na kolejnych slajdach zaprezentowano sposób postępowania (wykorzystania metod symulacji komputerowej) w przypadku badań możliwości poprawy bezpieczeństwa osób z określonymi typami amputacji kończyn.
- ❖ Prezentację kończy temat zastosowań metod symulacji do uogólniania wyników z ograniczonej liczby możliwych do przeprowadzenia testów doświadczalnych na całą populację, dzięki możliwości ich (symulacji) wykorzystania do celów „skalowania” i „personalizacji”.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- ❖ Celem zadania, zrealizowanego przez Pracownię VISEB w ramach projektu VITES – Virtual Testing for Extended Vehicle Passive Safety, EU G3RD–2000–00312, było przeprowadzenie analizy ryzyka zwiększenia zagrożeń dla pasażera o nietypowym rozkładzie masy (będącym efektem amputacji kończyn), zajmującego przedni fotel w samochodzie osobowym, w czasie zderzenia czołowego oraz zaproponowanie modyfikacji istniejących rozwiązań standardowych, tak aby zapewnić lepszą ochronę wymienionej wyżej grupie osób niepełnosprawnych, bez wyraźnego pogorszenia komfortu „standardowych” pasażerów i bez konieczności dokonywania dużych zmian konstrukcyjnych w pojazdach.



<http://cdn12.se.smcloud.net/t/photos/303608/boli-noga-ktorej-nie-ma.jpg>

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



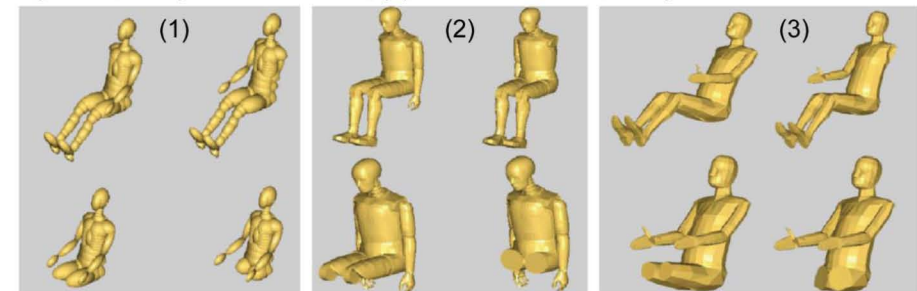
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- ❖ Jako metodę badawczą wykorzystano symulację komputerową przy użyciu systemu MADYMO.
- ❖ Zakłócenia rozkładu masy modelowano, usuwając z pełnego modelu człowieka /manekina odpowiednie segmenty. Dla wszystkich rozważanych wariantów niepełnosprawności przygotowano modele dla systemu MADYMO w następujących wersjach: (1) manekin Hybrid-3, wersja „ellipsoid”, (2) manekin Hybrid-3, wersja „facet-surface”, (3) model człowieka, wersja „facet-surface”.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



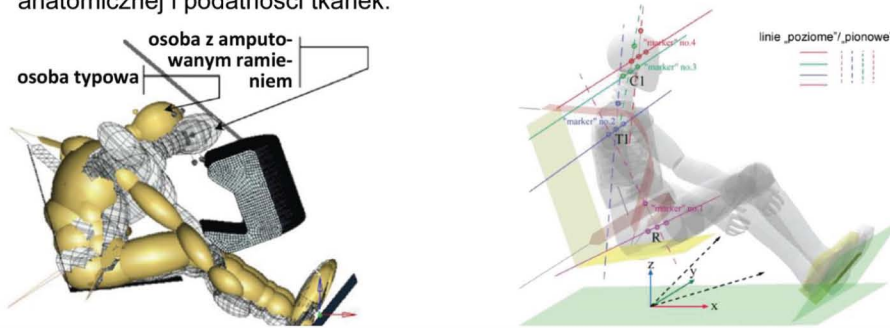
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- Zaproponowano nowe „rotacyjne” biomechaniczne kryterium obrażeń dla oceny różnic w zachowaniu się, w czasie wypadku drogowego, ciała pasażera „typowego” i dla wybranych przypadków niepełnosprawności, bazujące na względnych przemieszczeniach obrotowych poszczególnych segmentów ciała człowieka, które dla pewnych scenariuszy wypadków zdecydowanie przekraczają granice zakresów fizjologicznych, wynikających z budowy anatomicznej i podatności tkanek.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



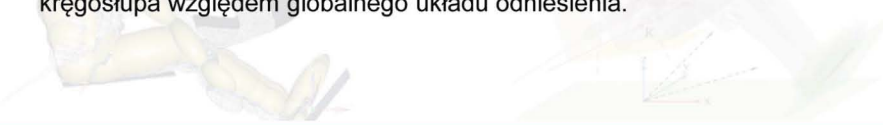
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- Na potrzeby kryterium „rotacyjnego” rejestrowano przebiegi kątów zgięcia-prostowania oraz skręcenia dla wybranych segmentów kręgosłupa:
  - zgięcie-prostowanie odcinka lędźwiowo-piersiowego,
  - skręcenie, względem osi długiej kręgosłupa, odcinka lędźwiowo -piersiowego,
  - zgięcie-prostowanie kompletnej kolumny kręgosłupa,
  - skręcenie, względem osi długiej kręgosłupa, kompletnej kolumny kręgosłupa,
  - zgięcie-prostowanie i skręcenie w połączeniu C1 z potylicą; pomiar skręcenia miał tu znaczenie czysto teoretyczne, ponieważ zgodnie z anatomiczną budową tego połączenia skręcenie w tym połączeniu, w prawidłowych warunkach fizjologicznych nie powinno mieć miejsca,
  - dotąd — wielkości zmian położenia kąтового wybranych segmentów kręgosłupa względem globalnego układu odniesienia.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



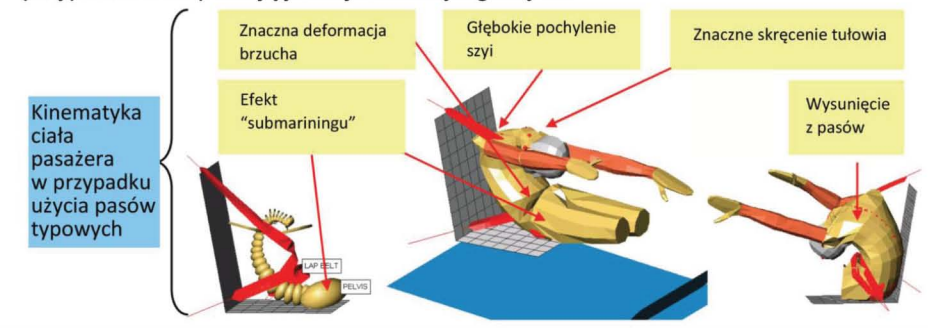
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- Otrzymane wyniki potwierdziły przypuszczenia, że brak części lub całości niektórych kończyn wpływa w istotny sposób na zachowanie się ciała pasażera w czasie wypadku.
- Zaobserwowano np. bardzo znaczne różnice (w stosunku do „typowego” pasażera) dotyczące skręcenia górnej części ciała względem osi kręgosłupa dla przypadku z amputacją jednej z kończyn górnych.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



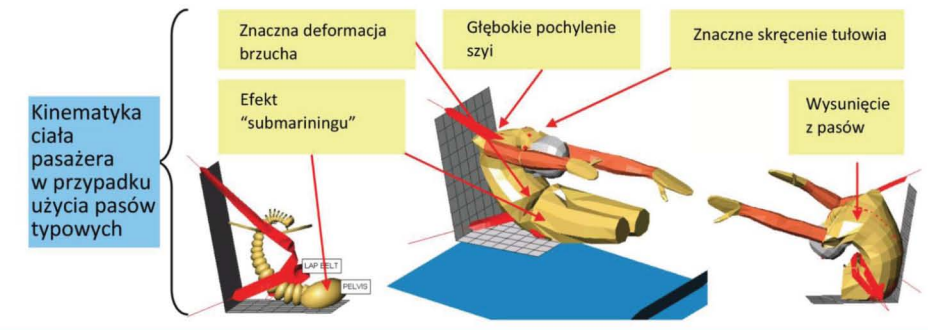
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- Zaobserwowano np. bardzo znaczne różnice (w stosunku do „typowego” pasażera) dotyczące skręcenia górnej części ciała względem osi kręgosłupa dla przypadku z amputacją jednej z kończyn górnych.
- Inny niebezpieczny mechanizm „wsuwania się pod pas biodrowy” ujawnił się w przypadku pasażera z amputowanymi kończynami dolnymi.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



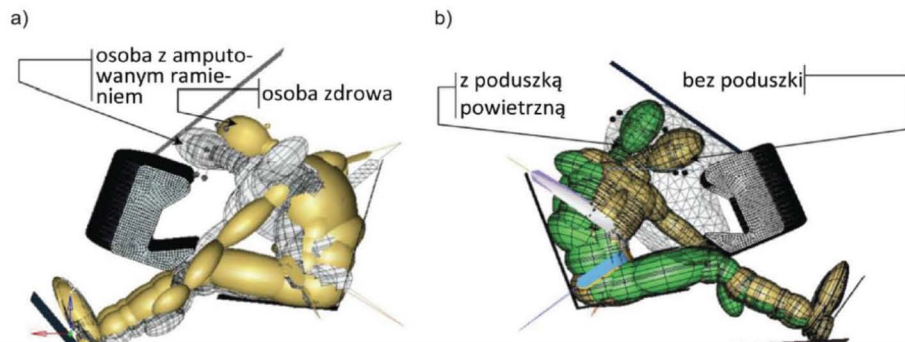
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- ❖ Opracowano metodę modułowego uzupełniania modelu otoczenia pasażera, co pozwalało na przeprowadzanie, w systematyczny sposób, oceny wpływu różnych elementów kabiny (w tym np. obecności poduszek powietrznych) na różnice w stopniu zagrożenia pasażerów „typowych” i niepełnosprawnych.
- ❖ Zaobserwowano korzystne działanie poduszki powietrznej.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



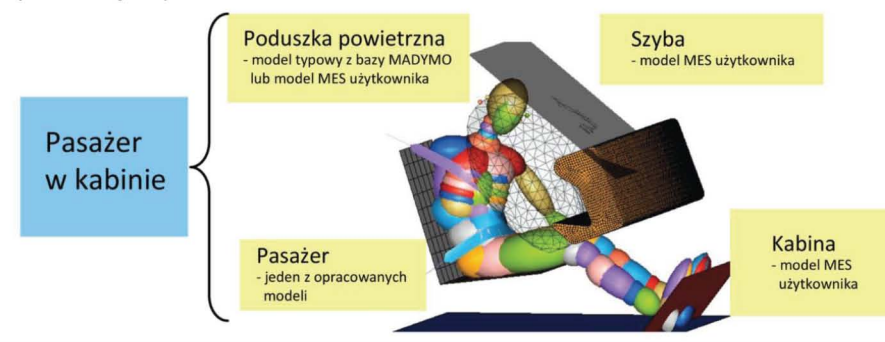
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- ❖ Opracowano metodę modułowego uzupełniania modelu otoczenia pasażera, co pozwalało na przeprowadzanie, w systematyczny sposób, oceny wpływu różnych elementów kabiny (w tym np. obecności poduszek powietrznych) na różnice w stopniu zagrożenia pasażerów „typowych” i niepełnosprawnych — rezultat praktyczny: moduł (wstępnie wypełniony „template”) włączany do pliku danych pakietu MADYMO .



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



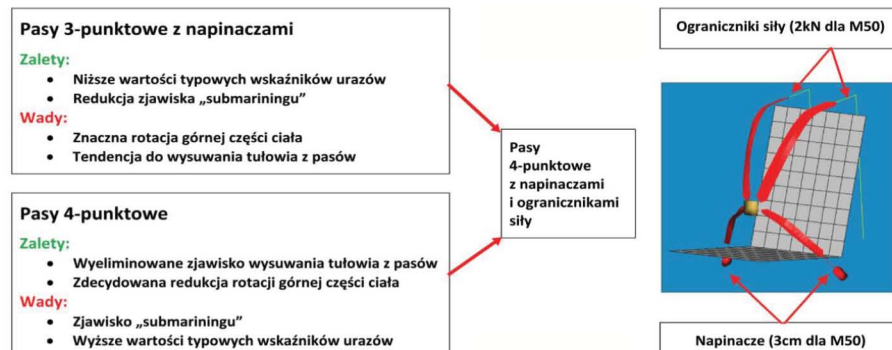
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn

- ❖ W wyniku przeprowadzenia serii symulacji, w czasie których sprawdzano wpływ różnych modyfikacji standardowego systemu pasów bezpieczeństwa na poprawę stopnia bezpieczeństwa ustalonej kategorii osób niepełnosprawnych, zaproponowano rozwiązanie z 4-punktowymi pasami z napinaczem i ogranicznikiem siły.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn — wnioski

- ❖ Uzyskane wyniki badań potwierdziły początkową tezę i wykazały, że brak kończyn (całkowity lub częściowy) może w istotny sposób wpływać na zachowanie się ciała pasażera samochodu w czasie wypadku drogowego.
- ❖ Dla niektórych przypadków analizowanych postaci niepełnosprawności obserwowano bardzo znaczne skrócenie odcinka piersiowo-lędźwiowego kręgosłupa, a także efekt „wypadania” pasażera z pasów bezpieczeństwa.
- ❖ Jako najbardziej niebezpieczny przypadek zidentyfikowano pasażera bez prawej kończyny górnej (dla pojazdów przystosowanych do ruchu prawostronnego).
- ❖ Wynika to z faktu zdecydowanego zakłócenia symetrii rozkładu masy takiej osoby (na brak symetrii własności bezwładnościowych ciała człowieka względem linii przebiegu części ramiennej typowego 3-punktowego pasa bezpieczeństwa nakłada się dodatkowe zakłócenie w postaci braku części masy — utraconej kończyny).

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Typowe pasy bezpieczeństwa a ochrona pasażerów z dysfunkcjami kończyn — wnioski

- ❖ Przeprowadzone badania wykazały, że niekorzystne zjawiska mogą być znacznie zredukowane lub wyeliminowane całkowicie po zastąpieniu standardowych pasów 3-punktowych, zmodyfikowanym systemem z pasami 4-punktowymi wyposażonym w odpowiednie mechanizm napinaczy i ograniczniki siły ustawione na wartość graniczną siły niższą niż ma to miejsce w istniejących aktualnie rozwiązaniach standardowych pasów 3-punktowych. Rozwiązanie takie eliminuje zarówno wsuwanie się ciała pasażera pod pas biodrowy, jak też zsuwanie się części ramiennej pasa bezpieczeństwa.
- ❖ W czasie wypadku, oprócz obciążeń „bezwładnościowych”, mogą pojawiać się istotne obciążenia wynikające z kontaktu poszczególnych części ciała (wykonującego nietypowy ruch) z elementami kabiny. Szczególnie zwiększenie ryzyka u osób z amputacjami kończyn dotyczy w tym przypadku głowy.
- ❖ Ostateczna optymalizacja systemu zabezpieczeń powinna być prowadzona dla ustalonej konfiguracji kabiny.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Skalowanie

- ❖ Zagadnienie poprawnego skalowania jest szczególnie istotne w przypadku budowy modeli ciała dzieci. Ze względu na prawie całkowity brak badań doświadczalnych z wykorzystaniem zwłok dzieci, modele takie powstają najczęściej na drodze skalowania modeli opracowanych dla dorosłych (zwykle 5-centylowych)
- ❖ Na kolejnych slajdach przedstawiono podstawowe informacje o procedurze „skalowania” i „personalizacji” modeli ciała człowieka, opracowanej w ramach realizacji projektu THOMO.
- ❖ Podstawę stanowił opracowany wcześniej i zwalidowany doświadczalnie szczegółowy model MES klatki piersiowej 50-centylowego mężczyzny.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Skalowanie

- ❖ W procedurze skalowania modelu referencyjnego do modeli 5- i 95-centylowych wykorzystano zestawy wybranych wymiarów zewnętrznych osobników płci męskiej i żeńskiej 5- 95-centylowych oraz 50-centylowego mężczyzny (osobnik referencyjny). Elementy struktury wewnętrznej (kości, mięśnie, organy wewnętrzne itp.) były skalowane proporcjonalnie do zmian wymiarów zewnętrznych.
- ❖ Uzyskano bardzo dobre wyniki przy skalowaniu „w górę” (do modelu 95-centylowego).
- ❖ Gorszy efekt uzyskano dla przypadku skalowania „w dół” (do modelu 5-centylowego). W szczególności dotyczy to przypadku modelu klatki piersiowej 5-centylowej kobiety uzyskanego z modelu referencyjnego 50-centylowego mężczyzny. Ze względu na pewne różnice w proporcjach ciał mężczyzny i kobiety, uzyskany ze skalowania model wymaga ręcznej korekty.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



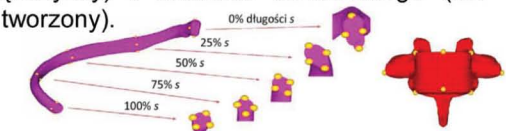
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



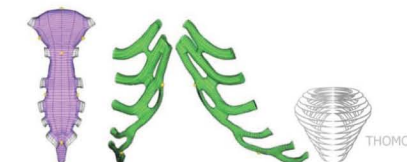
## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Personalizacja

- ❖ W procesie personalizacji wykorzystywano metodę „dual kriging” (opracowaną pierwotnie na potrzeby geologii i wykorzystywaną m.in. do poszukiwań złota) oraz zbiory współrzędnych kilkuset charakterystycznych anatomicznie punktów kontrolnych (ściśle związanych z określonymi punktami ciała) dla przypadku referencyjnego (50-centylowego mężczyzny) i aktualnie rozważanego (dla którego model spersonalizowany był tworzony).



- ❖ Na tej podstawie możliwe było, w znacznym stopniu zautomatyzowane, przetworzenie kompletnego modelu MES, z zachowaniem wszystkich elementów i odpowiednio przeliczonymi współrzędnymi węzłów.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie





## PRZYKŁAD ZASTOSOWAŃ METOD SYMULACYJNYCH

### Podziękowania

W prezentacji wykorzystano wyniki badań własnych zrealizowanych w ramach współfinansowanych przez Komisję Europejską projektów:

- VITES (Virtual Testing for Extended Vehicle Passive Safety), kontrakt: G3RD–2000–00312, 2001-2004
- THOMO (Development of a Finite Element Model of the Human Thorax and Upper Extremities), kontrakt: SCP7-GA-2008-218643), 2009-2012.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T6. Wybrane aspekty etyczne i prawne prowadzenia prac doświadczalnych w biomechanice

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Czy niezbędne są badania z wykorzystaniem PMHS?

- ❖ Ze względów moralnych, etycznych i religijnych część opinii publicznej (większa lub mniejsza, w zależności od kraju/kręgu kulturowego/wyznania/...) jest przekonana, że wykorzystywanie ludzkich zwłok (PMHS – *Postmortem Human Subjects*) do badań biomechanicznych, w tym w celu zwiększenia bezpieczeństwa ruchu drogowego, nie powinno mieć miejsca.
- ❖ Przekonanie takie jest często podtrzymywane przez środki masowego przekazu, które mają tendencję do twierdzenia, że manekiny i modele komputerowe są wystarczające do prowadzenia badań systemów projektowanych w celu poprawy bardziej bezpiecznych pojazdów. Nie jest to prawdą – zarówno manekiny, jak też modele komputerowe (pomimo bardzo szybkiego postępu w dziedzinie modelowania w ostatnich latach) są nadal dalekie od doskonałości.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

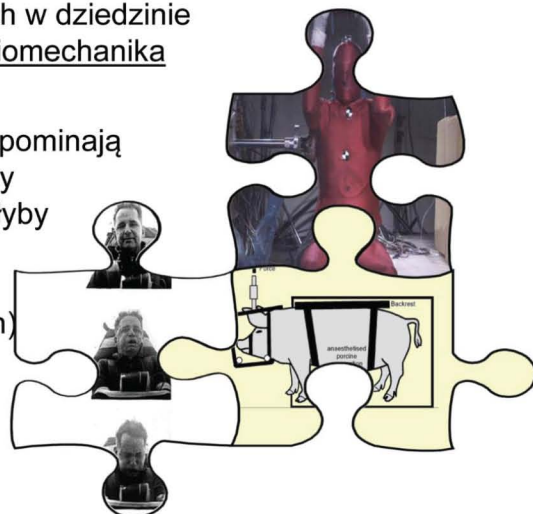
UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## WPROWADZENIE

Największe wątpliwości natury etyczno-prawnej dotyczą badań doświadczalnych w dziedzinie biomechaniki określanej jako biomechanika zderzeń.

W tym przypadku badania przypominają puzzle. Ponieważ eksperymenty w warunkach rzeczywistych byłyby zbyt niebezpieczne, istnieje konieczność prowadzenia (wzajemnie się uzupełniających) badań z wykorzystaniem zwierząt, zwłok (PMHS) i ochotników.



## Czy niezbędne są badania z wykorzystaniem PMHS?

- ❖ Niezbędna poprawa „biozgodności” manekinów i modeli komputerowych wymaga prowadzenie testów z wykorzystaniem PMHS w celu pozyskiwania danych dotyczących własności tkanek, mechanizmów ich uszkodzeń, a także odpowiedzi globalnych ciała człowieka, niezbędnych do ich walidacji.
- ❖ Korzystanie z ludzkich zwłok jest tylko jedną z metod badań wpływu zderzeń na uszkodzenia ciała ofiar wypadków, ale jedną z najważniejszych. W 1995 roku King i Viano<sup>\*)</sup> oszacowali liczbę uratowanych dzięki rozwojowi inżynierii bezpieczeństwa i porównali tę liczbę z liczbą PMHS użytych w badaniach biomechanicznych. Wyliczyli, że dzięki każdemu PMHS użytymu w badaniach nad poprawieniem bezpieczeństwa, uratowano życie ponad 60 osobom.

\*) A. King, D.C. Viano, N. Mizeres, J.D. States, "Humanitarian benefits of cadaver research on injury prevention", *The Journal of Trauma: Injury, Infection and Critical Care*, Vol. 38, No.4, pp 564-569, 1995.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH

- ❖ Dwa dokumenty zawierają zbiór, powszechnie akceptowanych w skali międzynarodowej, podstawowych zasad etycznych, jakie muszą być przestrzegane w czasie prowadzenia biomedycznych badań doświadczalnych (w tym z zakresu biomechaniki zderzeń): [The Nuernberg Code](#) (1946) oraz [Declaration of Helsinki](#) (1964 z późniejszymi uzupełnieniami).
- ❖ Zapisy tych dokumentów zostały wprowadzone, bezpośrednio lub po odpowiedniej adaptacji, do przepisów krajowych na całym świecie.
- ❖ Wymienione wyżej dokumenty nie odnoszą się bezpośrednio do wykorzystania zwłok w badaniach naukowych, jednak nie zawierają też zapisów zabraniających prowadzenia takich badań. Wobec braku innych uregulowań prawnych, powszechnie przyjmuje się więc, że mogą być rozszerzone na badania z wykorzystaniem ciał zmarłych.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

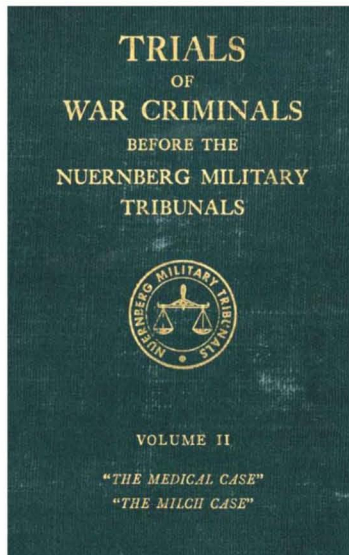
WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH

### The Nuernberg Code

1. Badania mogą być prowadzone tylko w przypadku ochotników, którzy wyrazili, w sposób nie budzący wątpliwości, zgodę na uczestniczenie w takich badaniach, bez jakiegokolwiek nacisku ze strony osób trzecich.\*
2. Prowadzony eksperyment musi służyć dostarczeniu istotnych, pewnych a nie przypadkowych, wyników służących dobru ludzkości, niemożliwych do uzyskania innymi metodami.
3. Eksperyment powinien być zaplanowany na podstawie istniejącej wiedzy dotyczącej badanej choroby lub innego rozważanego problemu, przy wykorzystaniu wyników wcześniejszych eksperymentów przeprowadzonych na zwierzętach i tak aby korzyści z oczekiwanych wyników uzasadniały jego przeprowadzenie.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH

### The Nuernberg Code

4. Eksperyment powinien być prowadzony w sposób zapewniający uniknięcie (zminimalizowanie) zbędnych cierpień (dolegliwości) fizycznych lub psychicznych oraz obrażeń.
5. Nie wolno prowadzić eksperymentów, w przypadku których istnieje *a priori* uzasadniona obawa, że ich skutkiem może być trwałe kalectwo lub śmierć.

Wyjątek mogą stanowić doświadczenia, w których prowadzący badania jest jednocześnie ich obiektem.

(**Przykład:** płk John Paul Stapp, USAF, 1954,  $v_{max}=1017\text{km/h}$ ,  $T_h=1,4\text{s}$ ,  $a_{max}=46,2\text{g}$ )

6. Stopień podejmowanego ryzyka (dla człowieka będącego obiektem badań) nigdy nie powinien przewyższać korzyści, jakie dzięki przeprowadzonemu eksperymentowi może odnieść ludzkość.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH

### The Nuernberg Code

- Należy przeprowadzić odpowiednie przygotowania i zapewnić właściwe warunki techniczne (lokalowe, sprzętowe) tak, aby maksymalnie zabezpieczyć obiekt badań przed możliwością doznania urazu (w tym o trwałych skutkach) lub utratą życia.
- Eksperyment powinien być prowadzony wyłącznie przez wykwalifikowany personel naukowy i pomocniczy dokładający najwyższej staranności przez cały czas trwania badań.
- Osoba będąca przedmiotem eksperymentu powinna mieć prawo przerwania eksperymentu i wycofania się z jego kontynuacji w przypadku osiągnięcia stanu fizycznego lub psychicznego, w którym dalszy swój udział uzna za niemożliwy.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH

### The Nuernberg Code

- Badacz kierujący eksperymentem musi być przygotowany na jego przerwanie/zakończenie w dowolnym momencie, gdy tylko dojdzie do przekonania, na podstawie wymaganej od niego najlepszej wiedzy i przeprowadzonej dokładnej oceny sytuacji, że kontynuacja badania może doprowadzić do powstania obrażeń, inwalidztwa lub śmierci osoby będącej obiektem eksperymentu.

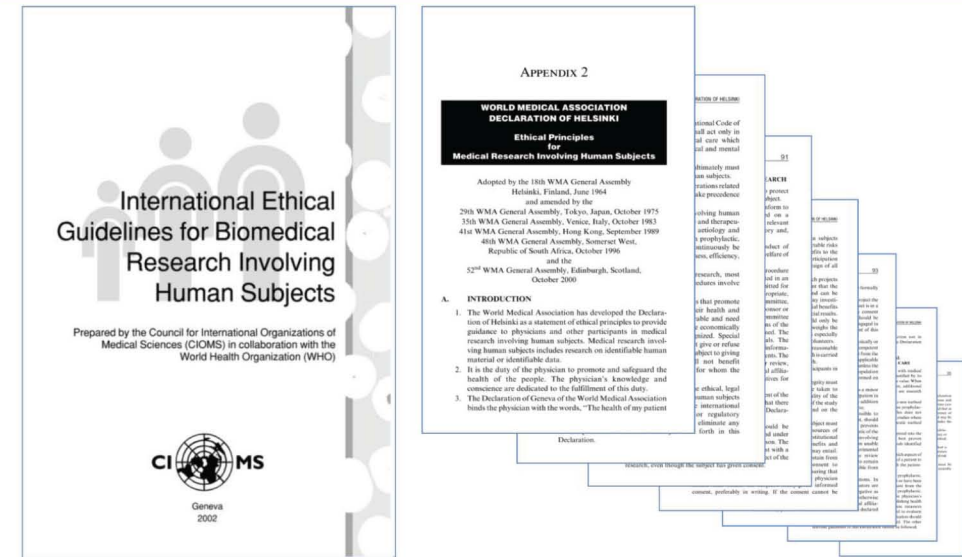


WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## ZBIÓR PODSTAWOWYCH ZASAD ETYCZNYCH

### Declaration of Helsinki

- [...]
- ❖ Protokół opisujący cel i przebieg eksperymentu powinien być przedłożony komisji etycznej, w celu zebranie uwag, komentarzy i wskazówek, a w stosownych przypadkach, uzyskania zgody na jego przeprowadzenie.
- ❖ Członkowie komisji etycznej muszą być niezależni od badacza, sponsora i nie podlegać innym naciskom.
- ❖ Komisja powinna działać zgodnie z prawem i przepisami kraju, w którym eksperyment jest prowadzony.
- ❖ Komisja ma prawo do monitorowania bieżących badań.
- ❖ Badacz ma obowiązek informowania komisji, w szczególności o wszelkich poważnych zdarzeniach niepożądanych.
- ❖ Badacz powinien również złożyć do komisji, do wglądu, informacje dotyczące finansowania, sponsorów, przynależności instytucjonalnych i potencjalnych konfliktów interesów.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

- ❖ Ludzkie zwłoki stosowane są w badaniach biomechanicznych w bardzo niewielu krajach. Wynika to z kilku powodów. W niektórych zabronione jest to przez prawo a w innych nie przeprowadza się ich ze względu na presję wywieraną przez opinię publiczną.
- ❖ Tam, gdzie takie badania są dozwolone, są one ściśle nadzorowane i przeprowadzanie zgodnie z określonymi zasadami.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

### Francja

- ❖ We Francji, ustawa o bioetyce, nr 94-654 z 29 lipca 1994 roku, dotyczy usuwania narządów w celach diagnostycznych, transplantacji lub innej działalności naukowej. Zakłada się, że o ile nie zostało określone inaczej, organy mogą zostać przeznaczone do transplantacji.
- ❖ Z drugiej strony jeżeli ciało i poszczególne organy mają być wykorzystane w innym celu niż transplantacja lub ustalenie przyczyn śmierci, to zgoda musi być podpisana i zarejestrowana wcześniej.
- ❖ Jeżeli zmarły wcześniej podpisał zgodę na przekazanie ciała do badań, to rodzina zmarłego nie może się temu przeciwstawić.
- ❖ Jeżeli wola zmarłego nie jest znana, to decyzję podejmuje rodzina.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

### Niemcy

- ❖ W Niemczech wykorzystanie zwłok podlega prawu o przeszczepach narządów, chociaż to prawo nie mówi nic o całych zwłokach.
- ❖ Część PMHS pochodzi od osób, które za życia wyraziły zgodę, podpisując odpowiednią umowę, określającą zakres wykorzystania ich zwłok po śmierci. Jednak w większości przypadków o możliwości przekazania zwłok do badań biomechanicznych pytani są członkowie najbliższej rodziny zmarłego (zgoda musi być wyrażona na piśmie), których informuje się o:
  - rodzaju obciążenia, jakie będzie działać na zwłoki,
  - spodziewanym rodzajem i ciężkością urazu,
  - typie autopsji, która będzie przeprowadzana,
  - pobraniu i zabezpieczeniu próbek tkanek do dalszych badań.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

### Stany Zjednoczone

- ❖ W Stanach Zjednoczonych występuje niezgodność pomiędzy różnymi aktami prawnymi.
- ❖ Zabronione naruszenie integralności ciała ludzkiego (= profanacja).
- ❖ W niektórych stanach darowizna zwłok dla celów naukowych jest dopuszczona, ale pod różnymi warunkami. W niektórych przypadkach taka darowizna musi być zgłoszona przed śmiercią, a rodzina może się i tak na to nie zgodzić.
- ❖ W innych stanach, darowizna taka nie jest dozwolona przed śmiercią. Dopiero po śmierci, rodzina może zezwolić na wykorzystanie zwłok dla celów naukowych.
- ❖ Działalność naukowa w dziedzinie biomechaniki zderzeń jest nadzorowana przez szczegółowe przepisy (np. zarządzenia: 700-3 i 700-4 NHTSA).

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



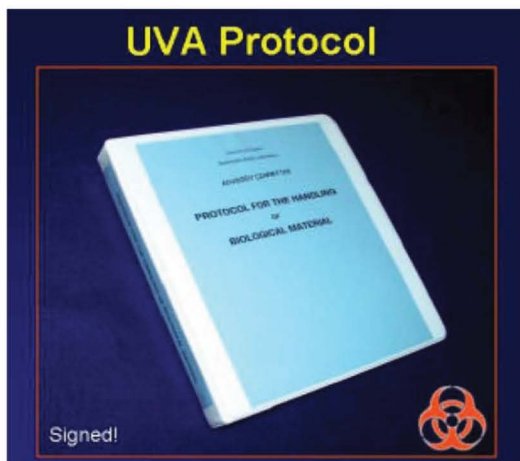
KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

Przykład protokołu postępowania: UVA-CAB, VA, USA



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

Przykład protokołu postępowania: UVA-CAB, VA, USA

- ❖ W stanie Virginia funkcjonuje program donacji zwłok — zainteresowane osoby podpisują zgodę na wykorzystanie swojego ciała po śmierci w celach naukowych.
- ❖ Dodatkowa zgoda jest potrzebna, jeżeli mają to być testy typu *crash* cywilne.
- ❖ I jeszcze jedna zgoda — w przypadku testów typu *crash* dla wojska.
- ❖ Po śmierci i sprawdzeniu, na co dana osoba się zgodziła, coroner/inna uprawniona instytucja przesyła informację do UVA-CAB, z zapytaniem, czy Centrum jest zainteresowane takim ciałem.
- ❖ Jeżeli tak, CAB kontaktuje się z najbliższą rodziną (jeżeli jest to możliwe) z pytaniem, czy zgadza się ona na wykorzystanie ciała zmarłego w testach prowadzonych w CAB. Rodzina informowana jest tylko ogólnie, o jakie testy chodzi, nie podaje się szczegółowego opisu.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

Przykład protokołu postępowania: UVA-CAB, VA, USA

- ❖ Jeżeli rodzina odpowie NIE (bez względu na to, czy zmarły zgodził się na wykorzystanie swojego ciała dla nauki), CAB odstępuje od przejęcia ciała.
- ❖ Jeżeli odpowiedź brzmi TAK, ciało poddawane jest odpowiednim badaniom medycznym (nosicielstwo określonych wirusów, CT itp.) i na tej podstawie kwalifikowane do wykorzystania w CAB (wprowadzane do bazy danych i umieszczane w zamrażarce) lub zwracane.
- ❖ Przed testem, przed specjalną radą, zostaje zaprezentowany protokół z dokładnym opisem badań i sposobem obchodzenia się ze zmarłym.
- ❖ Podczas testów każdy z pracowników CAB musi stosować się do wewnętrznego protokołu odnośnie badań z materiałem biologicznym (noszenie specjalnego stroju, zakrywanie twarzy zmarłego itp.).

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## BADANIA Z WYKORZYSTANIEM PMHS — ZASADY

Przykład protokołu postępowania: UVA-CAB, VA, USA

- ❖ W przypadku każdego testu bardzo dużą rolę przykładają się do prawidłowego zbierania i dokumentowania i zabezpieczania do wykorzystania, w pracach bieżących i w przyszłych badaniach, możliwie dużej liczby danych, tak aby każdy z testów z wykorzystaniem PMHS mógł przynieść jak najwięcej informacji.
- ❖ Po testach, całe ciało lub poszczególne jego komponenty mogą zostać wykorzystane ponownie.
- ❖ Jeżeli ciało/komponenty nie mogą już być wykorzystywane dalej, przekazywane są rodzinie (jeżeli rodzina wyraża taką wolę) lub kremowane. Raz w roku CAB organizuje ceremonię rozsypywania prochów, o której rodzina też jest informowana.
- ❖ W Stanach Zjednoczonych jest kilka miejsc, w których przeprowadza się badania z wykorzystaniem PMHS. Każde z tych miejsc ma własny szczegółowy protokół postępowania.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## PODSUMOWANIE

- ❖ Testy z wykorzystaniem PMHS są istotnym źródłem danych niezbędnych dla poznania mechanizmów powstawania urazów ciała człowieka poddawanego obciążeniom o charakterze udarowym, co jest warunkiem dalszego postępu w zapobieganiu obrażeniom będącym skutkiem, między innymi, wypadków komunikacyjnych.
- ❖ Aby zminimalizować krytyczne nastawienie części społeczeństwa do prowadzenia takich badań, należy je przeprowadzać z zachowaniem ustalonych zasad etycznych i ścisłym przestrzeganiem obowiązującego w poszczególnych krajach prawa.
- ❖ Istotną rolę do spełnienia mają Komisje Etyczne zatwierdzające zakresy i protokoły badań oraz sprawujące funkcję kontrolną nad ich przebiegiem.
- ❖ Konieczna jest poprawa w zakresie gromadzenia i udostępniania wyników badań wszystkim zainteresowanym ośrodkom naukowym, aby unikać powtarzania badań oraz zapewnić realizację zasady przyświecającej osobom ofiarującym swe ciało po śmierci dla nauki: „darowizna dla nauki = darowizna dla ludzkości”.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Uwagi końcowe, źródła, piśmiennictwo

- ❖ Dodatkowy materiał filmowy:  
fragment filmu *Understanding Car Crashes When Physics Meets Biology*, IIHS  
— ekstremalny test z udziałem ochotnika (płk John Paul Stapp), USAF, 1954,  
 $v_{0,max}=1017\text{km/h}$ ,  $\Delta t=1,4\text{s}$ ,  $a_{max}=46,2g$ ).



### Materiały źródłowe:

- ❖ Trials of War Criminals Before the Nuernberg Military Tribunals Under Control Council Law No. 10, Vol. II, Nuernberg 1946-1949.
- ❖ International Ethical Guidelines for Biomedical Research Involving Human Subjects, Council for International Organizations of Medical Sciences, Geneva 2002.
- ❖ Proceedings of the European Passive Safety Network Workshop: Ethical Guidelines in Biomechanical Testing, May 22-23, 2001, Lyon-Bron, France.
- ❖ Report D88: Definition of ethical rules and guidelines for biomechanical research on behalf of APSN, Advanced Passive Safety Network, March 2006.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

# WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

## T7. Metody i narzędzia rejestracji ruchu ciała człowieka w biomechanice sportu, ergonomii i rehabilitacji

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

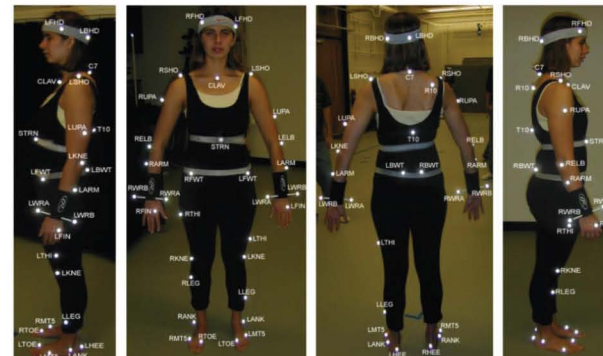


UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## WPROWADZENIE

- ❖ Do zalet metody kinematograficznej zaliczyć można bardzo dobrą dokładność uzyskiwanych wyników oraz praktycznie bezdotykowy charakter zapewniający minimalizację wpływu pomiarów na realizację ruchu (w większości przypadków wykorzystywany jest zestaw markerów mocowanych do ciała, co jednak w znaczący sposób nie zakłóca ruchu).



Źródło: <http://mocap.cs.cmu.edu/markerPlacementGuide.pdf>

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

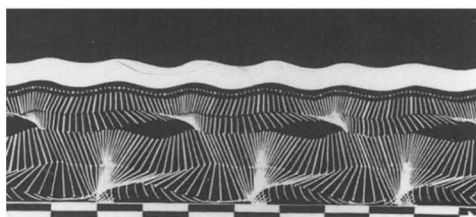
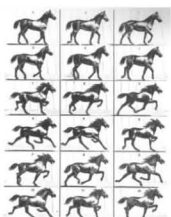
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## WPROWADZENIE

- ❖ Główną metodą rejestracji ruchu ciała człowieka w biomechanice, pozostaje od lat metoda kinematograficzna.
- ❖ Za pionierów wykorzystania tej metody można uznać dziewiętnastowiecznych badaczy, takich jak: E. J. Muybridge, E.-J. Marey oraz Ch.W. Braune i O. Fisher.



- ❖ Tych dwóch ostatnich, można uznać za prekursorów wykorzystania rejestracji ruchu metodą kinematograficzną jako podstawy do rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki (wyznaczenia sił i momentów sił) występujących w układzie mięśniowo-szkieletowym człowieka podczas ruchu.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## WPROWADZENIE

- ❖ Od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, pierwotnie wykorzystywane kamery analogowe (rejestrujące obraz na taśmie filmowej) zastępowane są kamerami cyfrowymi (od około ćwierćwiecza, praktycznie całkowicie), często zsynchronizowanymi z oświetleniem emitującym światło z zakresu podczerwieni, co pozwala na prowadzenie pomiarów bez zakłóceń, w normalnych warunkach oświetleniowych.



- ❖ Wrz z rozwojem systemów komputerowych znacznie ułatwiło to korzystanie z metod kinematograficznych, które stały się z narzędzia wykorzystywanego głównie do badań naukowych narzędziem wykorzystywanym na co dzień w wielu dziedzinach (np. w zastosowaniach medycznych czy ergonomii).

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY





## WPROWADZENIE

- ❖ Wraz z rozwojem elektroniki, pojawiła się możliwość miniaturyzacji i integracji różnorodnych czujników pomiarowych, a także łatwego przesyłania i gromadzenia rejestrowanych przez nie sygnałów.
- ❖ Pozwoliło to na wykorzystanie tych nowych możliwości również na potrzeby rejestracji ruchu ciała człowieka.
- ❖ Zwykle wykorzystywane są tzw. czujniki 9-D+, które w jednej miniaturowej obudowie mieszczą 3 czujniki trójosiowe: akcelerometr liniowy, żyroskop i magnetometr, +ewentualnie również GPS oraz niezbędny układ wzmacniacza, filtry i często moduły do bezprzewodowej transmisji danych. Typowe, komercyjne rozwiązania przedstawiono na rysunkach (możliwa jest dalsza miniaturyzacja).



Źródło: <https://www.xsens.com>

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

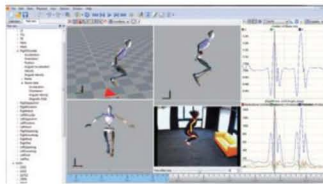


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## WPROWADZENIE

- ❖ Aby zarejestrowane położenia markerów lub sygnały z czujników 9-D+ mogły być przydatne w analizach biomechanicznych konieczne jest ich odpowiednie opracowanie/przetworzenie.
- ❖ Oczywiście komercyjne systemy dostarczane są z odpowiednim oprogramowaniem i większość użytkowników w zastosowaniach rutynowych (np. na potrzeby oceny postępów procesu rehabilitacji) może z nich korzystać nie mając „zielonego pojęcia” o sposobie przetwarzania rejestrowanych danych.



- ❖ Ponieważ jednak wykład ten przeznaczony jest dla Studentów wydziałów mechanicznych politechnik, na dalszych slajdach przedstawiono nieco informacji podstawowych.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

- ❖ Pierwszym zadaniem w analizie ruchu jest ustalenie układu(ów) współrzędnych, względem którego(ych) ruch jest rozpatrywany.
- ❖ W przypadku badania ruchu człowieka przy wykorzystaniu metody kinematograficznej oprócz globalnego układu współrzędnych (GUW) istnieje potrzeba określenia co najmniej dwóch lokalnych układów współrzędnych związanych z każdym z segmentów, jakie wyróżnia się w przyjętym modelu ciała.
- ❖ Są to lokalne układy określone na podstawie konfiguracji markerów przytwierdzonych do danego segmentu (LUM) oraz tzw. układy anatomiczne (LUA), których położenie i orientacja osi wynikają z budowy anatomicznej segmentu.
- ❖ Między lokalnymi układami „markerów” LUM i „anatomicznym” LUA, w przypadku każdego z segmentów, istnieje ścisła relacja (są względem siebie nieruchome).
- ❖ Położenie układu „markerów” LUM (a wobec powyższego, również „anatomicznego” LUA) względem układu globalnego GUW zmienia się w trakcie ruchu.

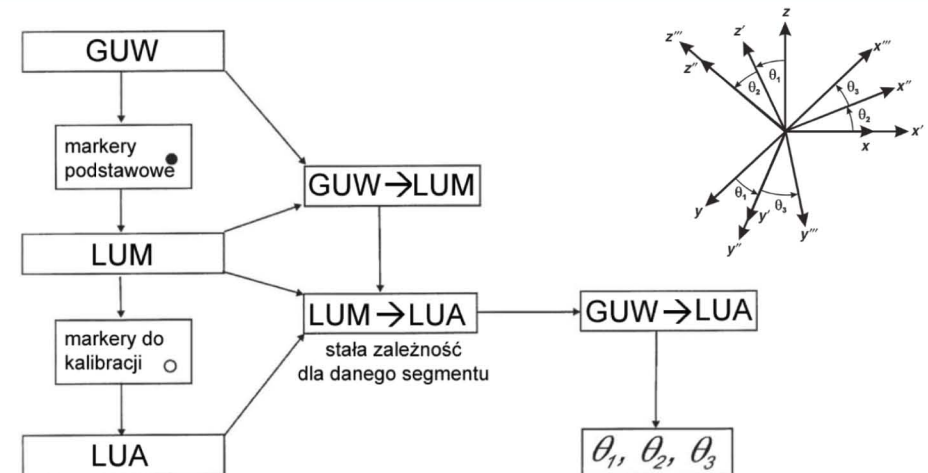
### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH — SCHEMAT TRANSFORMACJI



OGÓLNY SCHEMAT TRANSFORMACJI DANYCH POMIĘDZY OMÓWIANYMI UKŁADAMI WSPÓŁRZĘDNYCH.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

### Globalny Układ Współrzędnych (GUW)

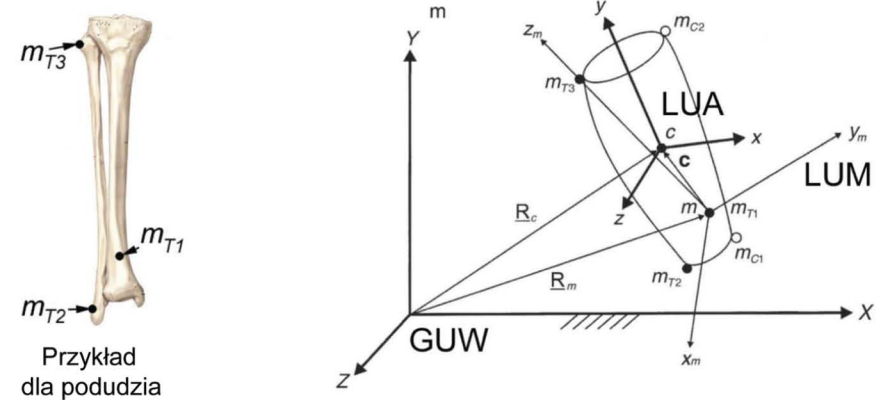
- Zwykle przyjmuje się następującą konwencję kierunków osi GUW: oś  $X$  skierowana jest w kierunku przemieszczania się badanej osoby, oś  $Y$  skierowana jest pionowo do góry (przeciwnie do kierunku przyspieszenia ziemskiego  $g$ ), natomiast oś  $Z$  stanowi dopełnienie do układu prawoskrętnego.
- Stąd  $XZ$  jest płaszczyzną poziomą prostopadłą do osi  $Y$ .
- W przypadku jednoczesnego wykorzystywania do pomiarów sił reakcji podłoża platform dynamometrycznych dokonuje się odpowiedniej kalibracji i „spasowania” GUW dla pomiarów położenia markerów metodą kinematograficzną i układu współrzędnych, w którym wyrażane są wielkości składowych sił reakcji rejestrowanych przez platformę(y) dynamometryczną(e).
- W wielu pracowniach prowadzących badania rutynowe zarówno położenie początku GUW, jak też zwrot osi są ustalone i nie ma potrzeby dokonywania kalibracji przed kolejną serią pomiarów.



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

### Układy lokalne, transformacja współrzędnych

- Drugi układ lokalny (układ „markerów” LUM:  $x_m, y_m, z_m$ ), dla każdego z rozważanych segmentów, definiowany jest na podstawie nie mniej niż 3 markerów związanych z danym segmentem (na rysunku markery:  $m_{T1}, m_{T2}, m_{T3}$ ).

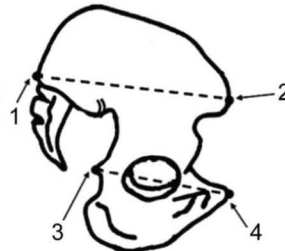
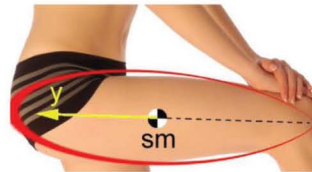


Przykład dla podudzia

## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

### Układy lokalne, transformacja współrzędnych

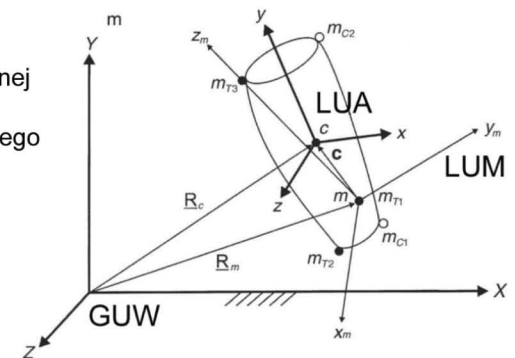
- Dla każdego z rozważanych segmentów należy zdefiniować związany z nim lokalny układ anatomiczny (LUA).
- Jego początek umieszcza się w środku masy segmentu, natomiast oś  $Y$  skierowana jest wzdłuż jego osi długiej (zwrot w kierunku końca „bliższego” (proksymalnego)).



- W przypadku segmentów nieregularnych (np. miednicy) kierunek osi  $Y$  wyznaczany jest na podstawie położenia wybranych punktów charakterystycznych anatomicznie (np. dla miednicy: 1 – kołek biodrowy tylny górny, 2 – kołek biodrowy przedni górny, 3 – kołek kulszowy, 4 – spojenie łonowe).

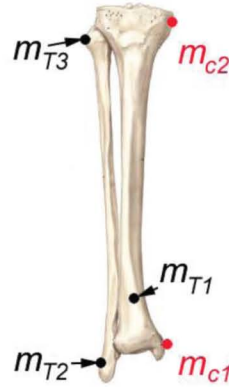
## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

- Markery związane z każdym z segmentów nie mogą być kolinearne.
- Wyznaczają wtedy płaszczyznę, w której leżą osie o zwrotach takich, że wszystkie markery ( $m_{T1}, m_{T2}, m_{T3}$ ) leżą w pierwszej ćwiartce układu  $X_m, Z_m$ .
- Położenie jednego z markerów wybierane jest jako początek LUM (w pokazanym na rysunku przypadku:  $m_{T1}$ , oznaczony dalej jako  $m$ ).
- Linia od  $m_{T1}$  do  $m_{T3}$  wyznacza dodatni kierunek osi  $z_m$ , oś  $y_m$  jest normalna do płaszczyzny wyznaczonej przez punkty:  $m_{T1}, m_{T2}, m_{T3}$  a  $x_m$  uzupełnia całość do ortogonalnego układu prawoskrętnego.



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

- Zadaniem procesu kalibracji „anatomicznej” jest znalezienie relacji pomiędzy układem LUM o osiach:  $x_m - y_m - z_m$  i układem LUA o osiach:  $x - y - z$ .
- Na potrzeby kalibracji dodaje się chwilowo dwa dodatkowe markery.
- Na przykład dla podudzia, gdy 3 podstawowe markery ( $m_{T1}$ ,  $m_{T2}$ ,  $m_{T3}$ ) umieszczone są w charakterystycznych punktach pokazanych na rysunku kolorem czarnym, dwa dodatkowe markery ( $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$ ) można umieścić na czas kalibracji w miejscach wskazanych kolorem czerwonym.
- Po umieszczeniu dodatkowych markerów dokonuje się krótkiej (wystarcza ok. 1 sekundy) rejestracji obrazu, dla badanego pozostającego w bezruchu, przy wykorzystaniu docelowego systemu kamer.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

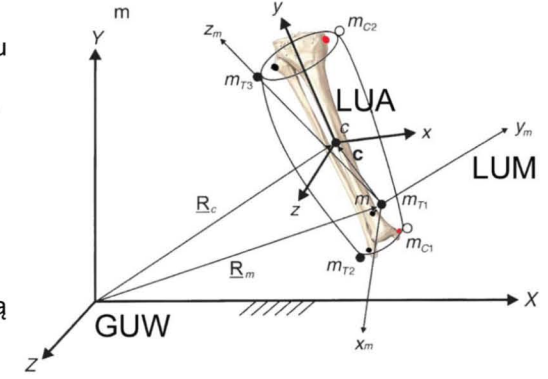


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

- Przedstawione postępowanie doprowadza do określenia jednoznacznej relacji między układami LUM i LUA.
- Położenie środka masy można względem dystalnego lub proksymalnego końca rozważanego segmentu można znaleźć wykorzystując dane antropometryczne (np. odpowiednie tablice lub oprogramowanie).
- Stąd, wyznaczenie wektora  $\mathbf{c}$  i dalej położenia początku układu LUA w globalnym układzie współrzędnych G UW (wektor  $\mathbf{R}_c$ ) jest również banalne.
- Po zakończeniu kalibracji, markery dodatkowe ( $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$ ) są usuwane i można przystąpić do właściwych pomiarów.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

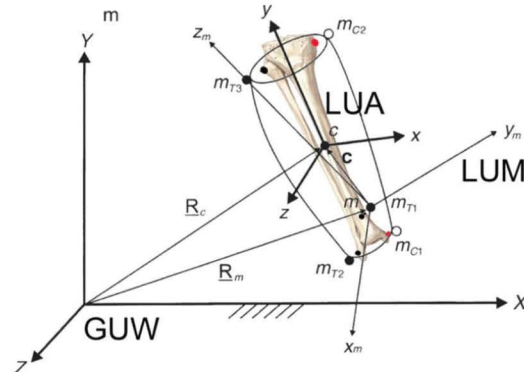


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH

- Przebieg osi  $y$  układu anatomicznego LUA wyznaczają teraz punkty będące środkiem odcinka wyznaczonego przez markery  $m_{T2}$  i  $m_{C1}$  oraz środkiem odcinka wyznaczonego przez markery  $m_{T3}$  i  $m_{C2}$ . Są to, odpowiednio, środki stawu skokowego i kolanowego.
- Oś  $x$  jest prostopadła do płaszczyzny wyznaczonej przez oś  $y$  i odcinek  $m_{C1}$  do  $m_{T2}$ .
- Oś  $z$  jest normalną do płaszczyzny  $x - y$ , skierowaną tak, aby  $x - y - z$  tworzyły układ prawoskrętny.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



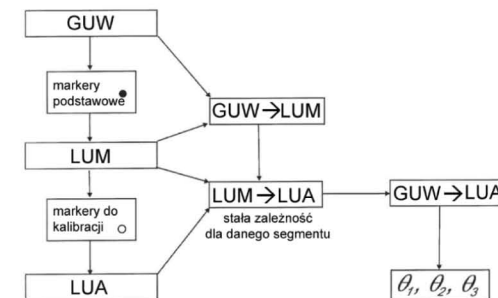
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

### Położenia katowe poszczególnych segmentów

- Na podstawie znajomości (w układzie globalnym G UW) położen markerów (przytwierdzonych do poszczególnych segmentów) obliczonych na podstawie obrazów rejestrowanych przez prawidłowo wykalibrowany system kamer oraz wykorzystaniu opisanych wcześniej transformacji między układami G UW, LUM, LUA



łatwo można określić położenia katowe segmentów względem układu G UW.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

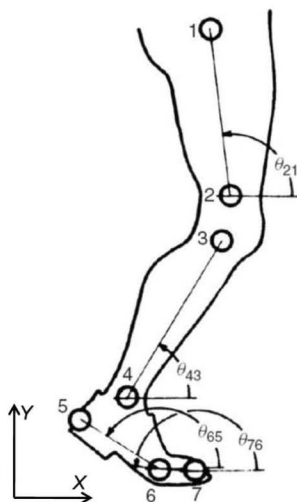
### Położenia kątowe poszczególnych segmentów

- ❖ Na rysunku pokazano zarys nogi (przypadek 2-D) z 7 markerami umieszczonymi w punktach leżących na osiach długich poszczególnych segmentów, wyznaczających linie, które mogą być przyjęte do określenia położenia kąтового uda, podudzia i dwóch części stopy, względem poziomu.
- ❖ Zwyczajowo kąty odmierzane są między linią poziomą a półprostą rozpoczynającą się w punkcie dystalnym w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.
- ❖ I tak na przykład:

- położenie kątowe uda:

$$\theta_{21} = \arctg(y_1 - y_2, x_1 - x_2)$$

(dla zachowania ciągłości narastania kąta, przy przejściu przez  $\pi/2$ , wykorzystuje się dwuargumentową funkcję  $\arctg(\Delta y, \Delta x)$ )



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

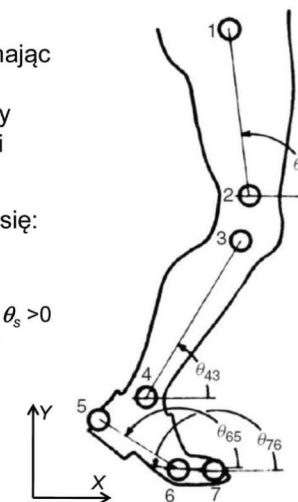
### Przemieszczenia kątowe w stawach

- ❖ Konwencja przyjęta dla stawu kolanowego nie jest obowiązująca dla wszystkich stawów (stąd, rozpoczynając analizę przebiegów kątów w stawach, zwłaszcza na podstawie danych uzyskanych z obcych źródeł, należy upewnić się co do przyjętych zasad ustalania wartości i kierunków dla poszczególnych kątów).
- ❖ Na przykład, dla stawu skokowego, zwykle przyjmuje się:



$$\theta_s = \theta_{43} - \theta_{65} + 90$$

(co oznacza, zgięcie grzbietowe dla  $\theta_s > 0$  oraz zgięcie podeszwowe dla  $\theta_s < 0$ )



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

### Położenia kątowe poszczególnych segmentów /przemieszczenia kątowe w stawach

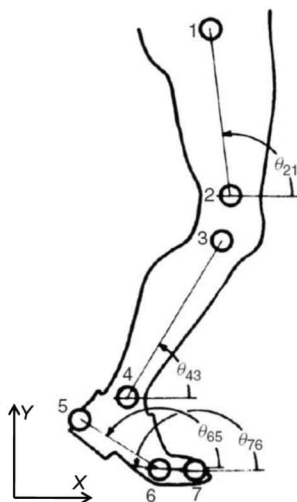
- ❖ W przypadku ogólnym, dla segmentu wyznaczonego punktem dystalnym  $j$  i proksymalnym  $i$ :
- położenie kątowe segmentu  $ji$ :

$$\theta_{ji} = \arctg(y_i - y_j, x_i - x_j)$$

- ❖ Mając wyznaczone położenia kątowe poszczególnych segmentów w GUV, można bez trudu znaleźć przemieszczenia kątowe w stawach, np.:

- dla stawu kolanowego:  $\theta_k = \theta_{21} - \theta_{43}$

(narastanie kąta  $\theta_k$  oznacza zginanie; kąt  $\theta_k$  maleje w czasie prostowania)



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

### Prędkości liniowe i kątowe

- ❖ Podstawową operacją, jaka musi być przeprowadzona przed wykorzystaniem danych o położeniach markerów do obliczania prędkości i przyspieszeń (zarówno kątowych, jak też liniowych), jest „wygładzenie” surowych przebiegów współrzędnych (najczęściej przez zastosowanie odpowiednich filtrów)<sup>7)</sup>.



- ❖ Najprostszą metodą obliczania pochodnych (np. składowych prędkości markerów) na podstawie przebiegów czasowych sygnałów (np. składowych współrzędnych markerów) jest metoda różnic skończonych.

<sup>7)</sup> Szczegółowe informacje na temat „wygładzania” danych doświadczalnych/filtrowania sygnałów można znaleźć w pracy: David A. Winter, „Biomechanics and motor control of human movement”, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2009. Są też przedmiotem wykładu: M. Świątlik, „Teoria sygnałów biologicznych”, PW, 2015.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

### Prędkości liniowe i kątowe

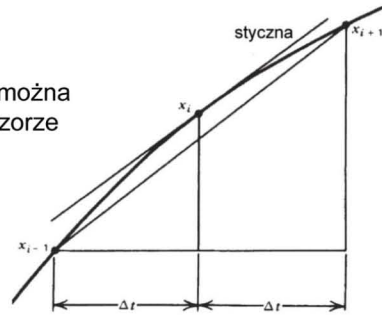
- Wycorzystuje się kilka wariantów metody różnic skończonych, np.:

$$v_{X_i} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t} \text{ m/s}$$

(jest to, rzecz jasna przybliżenie, wzór ten jest ścisły przy spełnieniu założenia, że nachylenie stycznej do  $x_i(t)$  w punkcie  $t = t_i$ , jest takie same jak nachylenie odcinka  $[x_{i-1}, x_{i+1}]$ )

- Do obliczenia prędkości kątowych wykorzystać można podobną zależność zastępując w powyższym wzorze przemieszczenia i prędkości liniowe, kątowymi:

$$\omega_i = \frac{\theta_{i+1} - \theta_{i-1}}{2\Delta t} \text{ rad/s}$$



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH

### Przyspieszenia liniowe i kątowe

- Podstawowy wzór:  $a_{X_i} = \frac{v_{X_{i+1}} - v_{X_{i-1}}}{2\Delta t} \text{ m/s}^2$

(łatwo zauważyć, że potrzebujemy tu 5 próbek danych od  $i-2$  do  $i+2$ )

- Przedstawiona poniżej alternatywna zależność wymaga tylko 3 próbek (od  $i-1$  do  $i+1$ )

$$a_{X_i} = \frac{v_{X_{i+1/2}} - v_{X_{i-1/2}}}{\Delta t} \text{ m/s}^2$$

gdzie:  $v_{X_{i+1/2}} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \text{ m/s}$        $v_{X_{i-1/2}} = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \text{ m/s}$

po podstawieniu:  $a_{X_i} = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2} \text{ m/s}^2$

- Do obliczenia przyspieszeń kątowych wykorzystać można podobne wzory zastępując w powyższych wyrażeniach przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia liniowe, kątowymi.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH — WZORY STIRLINGA

Dla zbioru par danych pomiarowych (np. współrzędnych markerów)  $\{t_i, f(t_i)\}$ , gdzie:  $t_{i+1} = t_i + h$  i  $h = \text{const}$ , należy utworzyć tabelę zgodnie z przedstawionym niżej wzorcem:

t	f(t)	$\delta f(t)$	$\delta^2 f(t)$	$\delta^3 f(t)$	$\delta^4 f(t)$
$t_0 - 2h$	$f(t_0 - 2h)$	$\delta f(t_0 - 3/2h) = f(t_0 - h) - f(t_0 - 2h)$	$\delta^2 f(t_0 - h) = \delta f(t_0 - 1/2h) - \delta f(t_0 - 3/2h)$	$\delta^3 f(t_0 - 1/2h) = \delta^2 f(t_0) - \delta^2 f(t_0 - h)$	$\delta^4 f(t_0) = \delta^3 f(t_0 + 1/2h) - \delta^3 f(t_0 - 1/2h)$
$t_0 - h$	$f(t_0 - h)$	$\delta f(t_0 - 1/2h) = f(t_0) - f(t_0 - h)$	$\delta^2 f(t_0) = \delta f(t_0 + 1/2h) - \delta f(t_0 - 1/2h)$	$\delta^3 f(t_0 + 1/2h) = \delta^2 f(t_0 + h) - \delta^2 f(t_0)$	
$t_0$	$f(t_0)$	$\delta f(t_0 + 1/2h) = f(t_0 + h) - f(t_0)$	$\delta^2 f(t_0 + h) = \delta f(t_0 + 3/2h) - \delta f(t_0 + 1/2h)$		
$t_0 + h$	$f(t_0 + h)$	$\delta f(t_0 + 3/2h) = f(t_0 + 2h) - f(t_0 + h)$			
$t_0 + 2h$	$f(t_0 + 2h)$				

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## OBLICZENIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH — WZORY STIRLINGA

Pierwszą i drugą pochodną można policzyć korzystając z tabeli i stosując formuły:

$$f'(t_0) = \frac{1}{h} \left[ \frac{\delta f(t_0 - \frac{1}{2}h) + \delta f(t_0 + \frac{1}{2}h)}{2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{\delta^3 f(t_0 - \frac{1}{2}h) + \delta^3 f(t_0 + \frac{1}{2}h)}{2} + \dots \right]$$

$$f''(t_0) = \frac{1}{h^2} \left[ \delta^2 f(t_0) - \frac{1}{12} \delta^4 f(t_0) + \frac{1}{90} \delta^6 f(t_0) + \dots \right]$$

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Uwagi końcowe, źródła, piśmiennictwo

❖ Podstawowe źródło wykorzystanych informacji i materiału wyjściowego do ilustracji:

David A. Winter: Biomechanics and motor control of human movement, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2009.

❖ Warto zapoznać się z:

pełnym tekstem rozdz. 7. i 3. wymienionej wyżej książki.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

## Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



# Cezary Rzymkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

## WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

### T8. Metody i narzędzia pomiaru i szacowania sił i momentów w układzie mięśniowo-szkieletowym człowieka

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

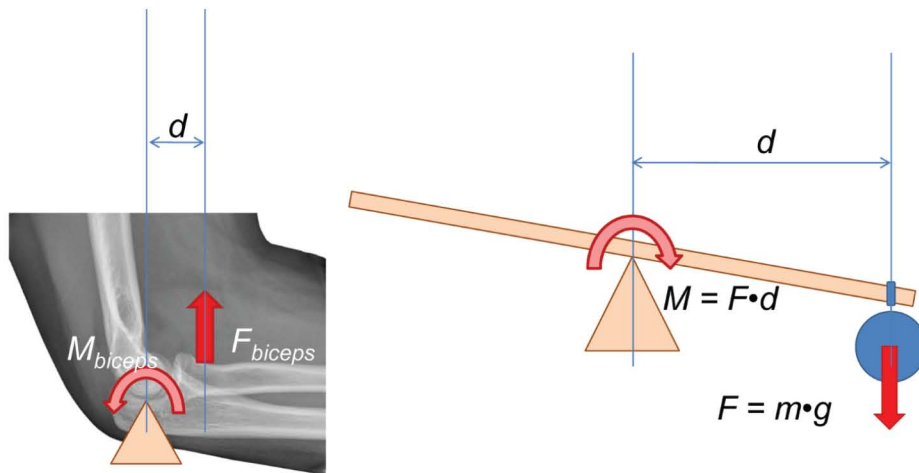
- ❖ **Możliwości bezpośrednich pomiarów sił w układzie mięśniowo-szkieletowym człowieka są bardzo ograniczone.**
- ❖ Technicznie możliwe jest wykorzystanie czujników, które po wszczępieniu chirurgicznym, potrafią mierzyć siłę wywieraną przez mięśnie na ścięgna.
- ❖ Jednakże taka technika pomiaru jest dotychczas stosowana w bardzo ograniczonym zakresie, tylko podczas eksperymentów, głównie z wykorzystaniem zwierząt.
- ❖ Pojawiają się również doniesienia o próbach eksperymentalnego instalowania czujników pomiarowych w endoprotezach stawów wszczępianych ze względów medycznych.
- ❖ Głównym powodem ograniczającym wykorzystanie pomiarów bezpośrednich jest ich inwazyjność.
- ❖ **Dlatego w praktyce wykorzystywane są metody pośrednie, bazujące na modelach wirtualnych ciała człowieka (głównie wieloczonowych; w niektórych przypadkach korzysta się też z modeli wykorzystujących metodę elementów skończonych) i danych z pomiarów nieinwazyjnych (antropometrycznych i kinematycznych).**

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Siły i momenty sił

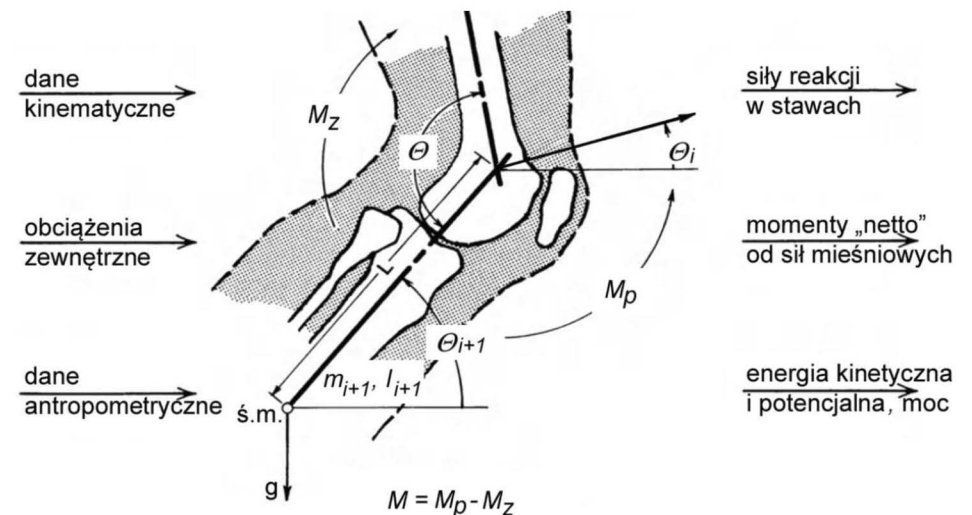


### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

- ❖ Na podstawie pełnego opisu kinematycznego<sup>\*)</sup>, dokładnych pomiarów antropometrycznych oraz wartości sił zewnętrznych jesteśmy w stanie obliczyć siły reakcji w stawach i momenty „netto” sił generowanych przez mięśnie działających w poszczególnych stawach.
- ❖ Obliczenia takie noszą nazwę rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki i są bardzo ważnym narzędziem w uzyskiwaniu informacji o aktywności mięśni w każdym stawie.
- ❖ Informacje uzyskane w ten sposób są przydatne do oceny poprawności treningu, planowania przebiegu i oceny skutków operacji ortopedycznej, rehabilitacji itp.

<sup>\*)</sup> Metody pozyskiwania danych kinematycznych zostały zaprezentowane w module T7.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Założenia dla typowego modelu dla odwrotnego zadania dynamiki

- ❖ Położenie środka masy, w układzie związanym z danym segmentem, jest stałe w trakcie ruchu.
- ❖ Wszystkie stawy są kuliste lub zawiasowe (przez cały czas).
- ❖ Moment bezwładności każdego segmentu, względem środka jego masy, jest stały w trakcie ruchu.
- ❖ Każdy badany segment (element) posiada masę skupioną w środku masy.
- ❖ Długość każdego segmentu (odległość między ograniczającymi go stawami) jest stała w trakcie ruchu.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy dla odwrotnego zadania dynamiki

- ❖ Wartość uzyskanych wyników zależy od jakości modelu, na podstawie którego zostały uzyskane, m.in. słuszności przyjętych założeń upraszczających (np. dotyczących geometrii stawów), zastosowanego aparatu matematycznego itp.
- ❖ Dla uzyskania prawidłowych wyników z dobrego modelu, konieczne jest ponadto wprowadzenie dostatecznie dokładnych wartości jego parametrów (np. mas oraz momenty bezwładności poszczególnych segmentów, położenia środków mas, wzajemnego usytuowania względem siebie poszczególnych stawów i lokalnych układów współrzędnych związanych z poszczególnymi segmentami, własności materiałowych itp.).
- ❖ Dane te można uzyskać korzystając z bezpośrednich pomiarów oraz (gdy wyniki bezpośrednich pomiarów są niedostępne) z odpowiednich tabel statystycznych, uwzględniając (w najprostszym przypadku) wzrost wagę oraz płeć badanej osoby.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

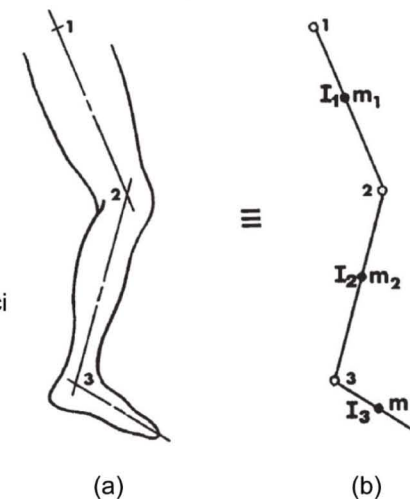
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model anatomiczny a model obliczeniowy

- ❖ Rysunek pokazuje podobieństwo między modelem anatomicznym (a) i obliczeniowym (b) kończyny dolnej.
- ❖ Masy poszczególnych segmentów  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  są skupione w punktach. Odległości tych punktów od stawów są stałe. Długości segmentów również są stałe tak jak i ich momenty bezwładności  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ .



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,  
udostępniany nieodpłatnie





## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Siły uwzględniane w modelu obliczeniowym

- ❖ Siły grawitacyjne  
— siły ciężkości działają w dół (zgodnie z kierunkiem wektora przyspieszenia ziemskiego), na masy poszczególnych segmentów (modelowane jako masy skupione położone w środkach mas tych segmentów), równe iloczynowi masy danego segmentu i przyspieszenia ziemskiego ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).
- ❖ Siły zewnętrzne  
— wszystkie siły działające na model muszą być dokładnie zmierzone (jak np. siły reakcji podłoża na stopy) lub wyznaczone/oszacowane w sposób pośredni; ponieważ wszystkie siły muszą być przedstawione w postaci wektorów, to konieczne jest ustalenie ich punktów przyłożenia.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

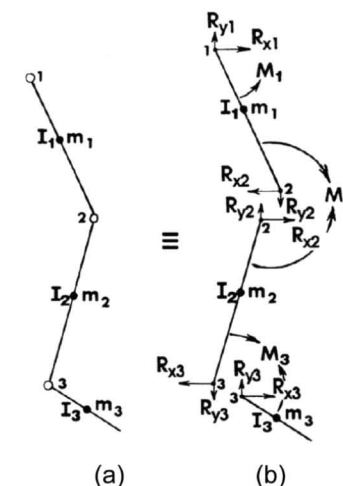
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, dostępny nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów”

- ❖ Przedstawione wcześniej 3 rodzaje sił uwzględnić należy w modelu obliczeniowym.
- ❖ Na potrzeby obliczeń pierwotny model obliczeniowy (a) zastępowany jest modelem „uwolnionym od więzów” (b).
- ❖ Wykorzystuje się tu znaną z mechaniki zasadę, w myśl której można zastąpić działanie więzów (w naszym przypadku wynikających z istnienia/budowy poszczególnych stawów) odpowiednimi reakcjami (siłami i momentami reakcji), co pozwala traktować poszczególne segmenty jako ciała swobodne znajdujące się pod działaniem omówionych sił czynnych i reakcji więzów (sił biernych).



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, dostępny nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Siły uwzględniane w modelu obliczeniowym

- ❖ Siły mięśni/więzadeł  
— aktywność mięśni w stawach można obliczyć jako momenty („netto”) sił generowanych przez te mięśnie:
  - jeżeli staw jest ściskany, to analiza obejmuje wypadkową sił mięśni agonistycznych i antagonistycznych działających na ten staw,
  - elementy pasywne takie jak więzadła, ograniczają zakres ruchu w stawie,
  - momenty sił wytwarzane przez te tkanki są uwzględniane w bilansie momentów wytwarzanych przez mięśnie w czasie ruchu; określenie wpływu pasywnych elementów na stawy jest możliwe tylko podczas ich działania,
  - elementy odpowiadające za skurcz w mięśniach generują w rzeczywistości większe wartości momentów siły, niż te przejawiające się w ścięgnach (m.in. wpływ tarcia w mięśniach), jednak ta różnica jest niewielka (kilka procent).
- ❖ Ponadto należy brać pod uwagę również tarcie występujące w stawach, które zmniejsza „użyteczną” wartość momentu „mięśniowego”.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

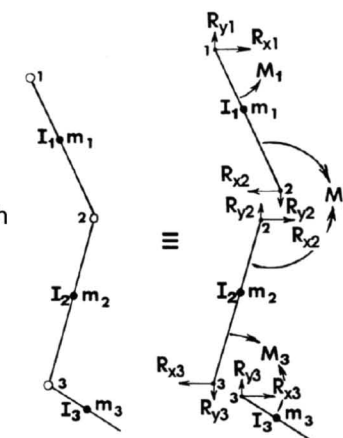
Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, dostępny nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów”

- ❖ Zgodnie z trzecią zasadą Newtona w każdym stawie, w rozważanym modelu, działającym siłom „akcji” odpowiadają siły „reakcji” (równe co do wartości modułu o przeciwnym zwrocie).
- ❖ Przekłada się to odpowiadające sobie obciążenia *dystalnych* („dalszych”) i *proksymalnych* („bliźszych”) końców łączących się w danym stawie segmentów.
- ❖ Pozwala to na iteracyjne wyznaczenie wszystkich nieznanymi sił/momentów sił w kolejnych stawach, poczynając od segmentów, dla których znane są obciążenia *dystalnych* końców (np. reakcje stóp z podłożem zmierzone za pomocą platform tensometrycznych) lub są to obciążenia zerowe (np. dłoń bez kontaktu z otoczeniem).



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, dostępny nieodpłatnie



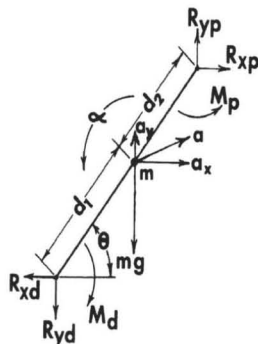
## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów” – podstawowe równania

Rozważmy ruch płaski segmentu, w którym dane kinematyczne, antropometryczne oraz wartości sił reakcji na jednym z końców tego segmentu (dla ustalenia uwagi przyjmijmy: *dystalnym*) są znane.

#### Wielkości znane:

- $m, I_0$  – masa i moment bezwładności względem osi prostopadłej do płaszczyzny ruchu przechodzące przez środek masy,
- $a_x, a_y$  – składowe wektora przyspieszeń liniowych działających na środek masy segmentu,
- $\alpha$  – przyspieszenie kątowe segmentu względem osi prostopadłej do płaszczyzny ruchu przechodzącej przez środek masy,
- $\theta$  – położenie kątowe segmentu na płaszczyźnie XY względem osi X,



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów” – podstawowe równania

#### Równania równowagi dla składowych sił

$$\Sigma F_x = ma_x \rightarrow R_{xp} - R_{xd} = ma_x$$

$$\Sigma F_y = ma_y \rightarrow R_{yp} - R_{yd} = ma_y$$

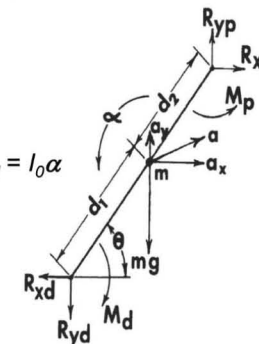
#### Równania równowagi dla momentów

(względem środka masy)

$$\Sigma M = I_0 \alpha$$

$$\rightarrow M_p + \cos(\theta)R_{yp} + \cos(\theta)R_{yd} - M_d - \sin(\theta)R_{xp} - \sin(\theta)R_{xd} = I_0 \alpha$$

Należy zauważyć, że aby obliczyć moment sił mięśniowych na końcu proksymalnym rozważanego segmentu, trzeba wcześniej wyznaczyć składowe siły reakcji  $R_{xp}$  oraz  $R_{yp}$ .



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

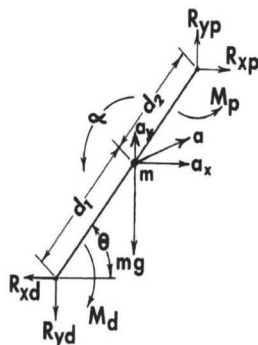
### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów” – podstawowe równania

#### Wielkości znane:

- $g$  – przyspieszenie ziemskie (kierunek przeciwny do osi Y),
- $d_1, d_2$  – odległości środka masy od końca *dystalnego* i *proksymalnego* segmentu,
- $R_{xd}, R_{yd}$  – składowe siły reakcji działających na *dystalny* koniec segmentu (wyznaczone wcześniej),
- $M_d$  – moment „netto” sił mięśniowych działających na *dystalny* koniec segmentu (wyznaczony wcześniej),

#### Wielkości nieznanne:

- $R_{xp}, R_{yp}$  – składowe siły reakcji działających na *proksymalny* koniec segmentu,
- $M_d$  – moment „netto” sił mięśniowych działających na *proksymalny* koniec analizowanego segmentu.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie

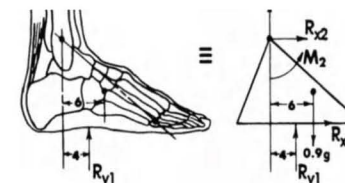


## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów” – PRZYKŁAD

Analizowana osoba stoi nieruchomo na jednej nodze, na płaskim podłożu. Siła reakcji podłoża działa 4 cm przed punktem oznaczającym staw skokowy. Masa badanego obiektu to 60kg, a masa stopy to 0,9kg. Należy obliczyć siły reakcji w stawie skokowym oraz moment sił mięśniowych („netto”).

Należy pamiętać, że przyjmuje się, że skumulowana siła reakcji podłoża  $R_{y1}$  zawsze działa w górę. Składowa pozioma siły reakcji  $R_{x1}$  działa w kierunku dodatnim (w prawo). Jeżeli siła ta działałaby w rzeczywistości w lewo, to należałoby przyjąć wartość ujemną.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniarni nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów” – PRZYKŁAD

Przyspieszenia:  $a_x, a_y, \alpha = 0$  (brak ruchu)

$R_{y1}$  = masa ciała =  $60 \times 9.8 = 588\text{N}$

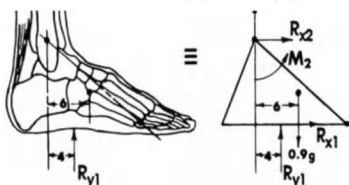
Równania równowagi składowych sił:

$$\Sigma F_x = ma_x, \quad \Sigma F_y = ma_y,$$

$$R_{x2} + R_{x1} = ma_x = 0 \quad R_{y2} + R_{y1} - mg = ma_y$$

$$R_{y2} + 588 - 0,9 \times 9,8 = 0 \rightarrow R_{y2} = -579,2\text{N}$$

Ujemna wartość  $R_{y2}$  oznacza, że siła działająca stopę w stawie skokowym jest skierowana w dół.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## SIŁY I MOMENTY SIŁ W UKŁADZIE MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYM

### Model obliczeniowy „uwolniony od więzów” – PRZYKŁAD

Równania równowagi momentów sił względem środka masy:

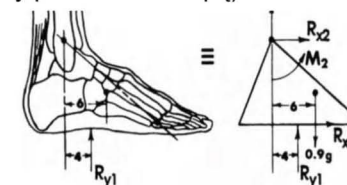
$$\Sigma M = I_0 \alpha$$

↓

$$M_2 - R_{y1} \times 0,02 - R_{y2} \times 0,06 = 0$$

$$M_2 = 588 \times 0,02 + (-579,2 \times 0,06) = -22,99\text{ Nm}$$

Ujemna wartość  $M_2$  oznacza, że rzeczywisty moment działający na stopę w stawie skokowym wywiera akcję w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara powodując nacisk przedniej części stopy na podłoże (co odzwierciedla składowa pionowa siły reakcji między podłożem a stopą).



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Zagadnienie udziałów mięśniowych – współdziałanie mięśni

- ❖ Z rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki można otrzymać **zbiorcze /wypadkowe przebiegi/wartości sił i momentów („netto”)** rozwijanych przez odpowiednie grupy mięśni „napędzających” poszczególne stawy.
- ❖ Jeśli następnie zachodzi **potrzeba wyznaczenia sił rozwijanych przez poszczególne mięśnie** to rozwiązanie takiego zadania jest znacznie trudniejsze. Wyznaczenie wartości sił mięśniowych lub wartości pobudzeń mięśni w trakcie realizowanego ruchu nazywane jest **zagadnieniem udziałów mięśniowych**<sup>\*)</sup>.
- ❖ Problem związany z wyznaczeniem poszczególnych sił mięśniowych polega na **nadmiernej liczbie mięśni-siłowników w stosunku do ruchliwości** układu kostnego. Ruch zgięcia w stawie łokciowym może być zrealizowany przez jeden mięsień, natomiast w układzie rzeczywistym jest realizowany przez kilka mięśni.

<sup>\*)</sup> W dalszej części prezentacji wykorzystano kilka slajdów z modułu: T8. *Współdziałanie mięśni* (M. Surowiec, C. Rzymkowski), opracowanego na potrzeby wykładu z przedmiotu *Wprowadzenie do biomechaniki*, MEiL PW, Warszawa 2015.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Zagadnienie udziałów mięśniowych

- ❖ Zadanie wyznaczenia sił mięśniowych, w sytuacji gdy liczba napędów jest znacznie większa niż liczba stopni swobody nie posiada jednoznacznego rozwiązania i dla wyznaczenia sił mięśniowych stosuje się idee zaczerpnięte z teorii sterowania, teorii sieci neuronowych albo wykorzystując algorytmy optymalizacyjne.
- ❖ Grupa metod wyznaczania sił mięśniowych – oparta na metodach optymalizacyjnych stosowana jest najczęściej. Zakłada się w nich, że mięśnie działają w zgodzie z określonymi kryteriami, które wynikają z minimalizacji określonych funkcji celu.
- ❖ Zastosowanie tu mają metody optymalizacji zarówno dynamicznej, w której poszukiwane są funkcji sił i pobudzeń mięśniowych na podstawie funkcjonau opisu zasady współpracy, jak i optymalizacji statycznej, w której wyznaczone są wartości sił i pobudzeń na podstawie funkcji kryterium współpracy.

#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Optymalizacja statyczna

Zadanie optymalizacji statycznej polega na wyznaczeniu wartości  $p$  parametrów  $y_1, \dots, y_p$ , które zapewnią minimalną wartość funkcji tych parametrów  $L$ .

$$L(y) = L(y_1, \dots, y_p) = \min$$

przy ograniczeniach równościowych co do momentów

$$M_{res}^{(i)}(y) = 0, \quad i = 1, \dots, n$$

i nierównościowych co do sił mięśniowych i pobudzeń

$$0 \leq f^i \leq f_{max}^i \quad 0 \leq a^i \leq 1$$



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Zagadnienie udziałów mięśniowych

Założenie:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{R}_i \times \mathbf{F}_i = \mathbf{M}$$

gdzie:

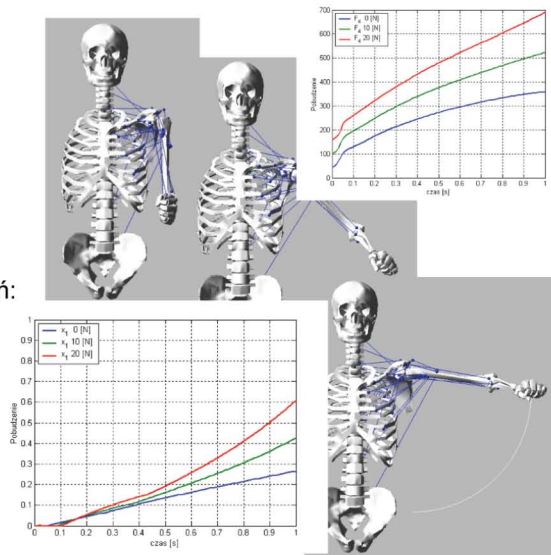
$R_i$  – promień wodzący  $i$ -tego mięśnia,  
 $F_i$  – siła  $i$ -tego mięśnia,  
 $M$  – sumaryczny moment sił w stawie,  
 $n$  – liczba mięśni.

Siła generowana przez  $i$ -ty mięsień:

$$F_i(l, v) = \sigma_i A_i x_i f_1(l) f_2(v)$$

Kryterium optymalizacyjne:

$$J(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min$$



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



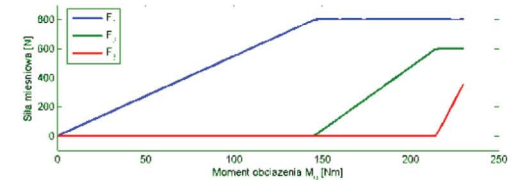
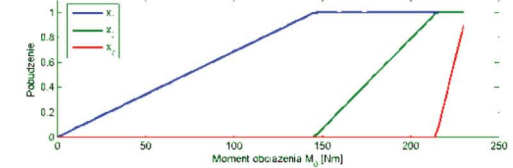
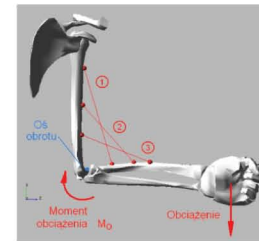
## Kryteria współpracy mięśni

### Kryterium liniowe

Jest dosłownym przełożeniem wytrzymałościowego kryterium najmniejszych naprężeń mięśniowych. Punktem wyjścia jest w tym przypadku wskaźnik jakości równy sumie pobudzeń wszystkich mięśni.

$$J = \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{gdzie:}$$

$i$  – numer mięśnia,  
 $n$  – liczba mięśni w układzie.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



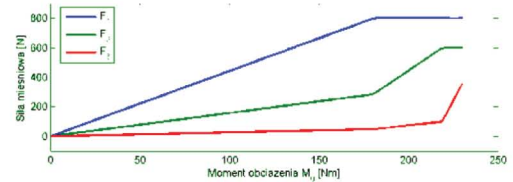
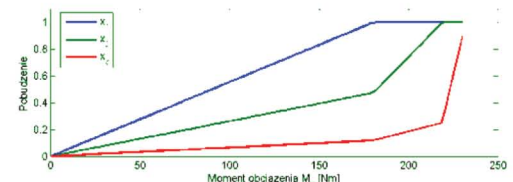
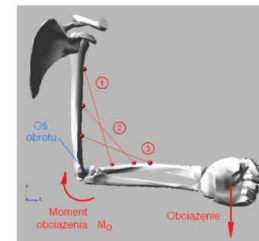
## Kryteria współpracy mięśni

### Kryterium kwadratowe

To kryterium optymalizacyjne oparte o zastosowanie funkcji minimalizacji jako sumy kwadratów pobudzeń mięśniowych. Jest to pierwszy przykład kryterium opartego o funkcje nieliniową.

$$J = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \text{gdzie:}$$

$i$  – numer mięśnia,  
 $n$  – liczba mięśni w układzie.



WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



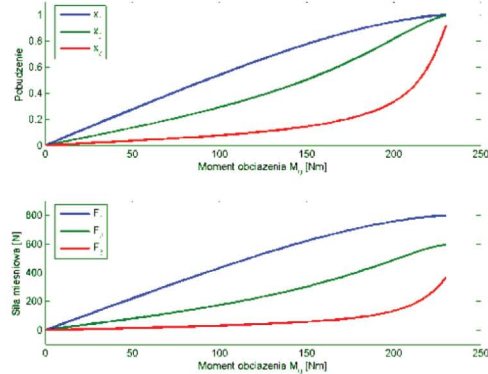
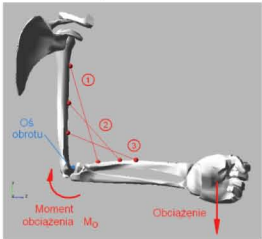
## Kryteria współpracy mięśni

### Kryterium łagodnego nasycenia

Oparte jest o minimalizację funkcji spełniająca dodatkowe założenie, jakim jest co najmniej dwukrotna różniczkowalność w przedziale (0,1). Dzięki temu uzyskiwane krzywe pobudzeń mięśniowych mają gładki, łagodny charakter.

$$J = \sum_{i=1}^n \left(1 - \sqrt{1 - x_i^2}\right)$$

gdzie:  
*i* – numer mięśnia,  
*n* – liczba mięśni w układzie.



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



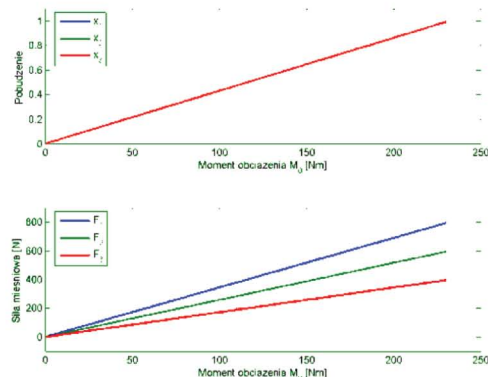
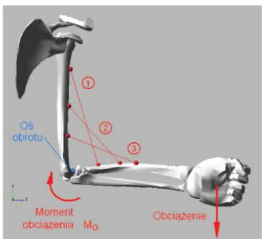
## Kryteria współpracy mięśni

### Kryterium minimax

Inne podejście podane jest w kryterium minimax, które jest rozwinięciem kryterium potęgowego (przy  $n \rightarrow \infty$ ). Przewidywania pobudzeń w oparciu o to kryterium mają charakter liniowego wzrostu pobudzeń od wartości minimalnej do maksymalnej.

$$J = \max_i x_i$$

gdzie:  
*i* – numer mięśnia,  
*n* – liczba mięśni w układzie.



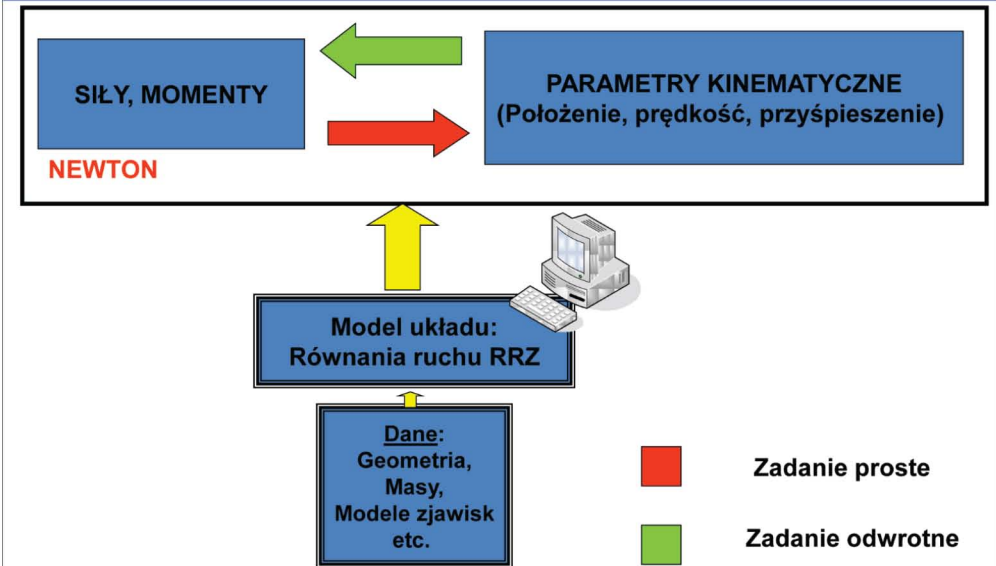
#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Przykład analizy z zastosowaniem modelu wirtualnego



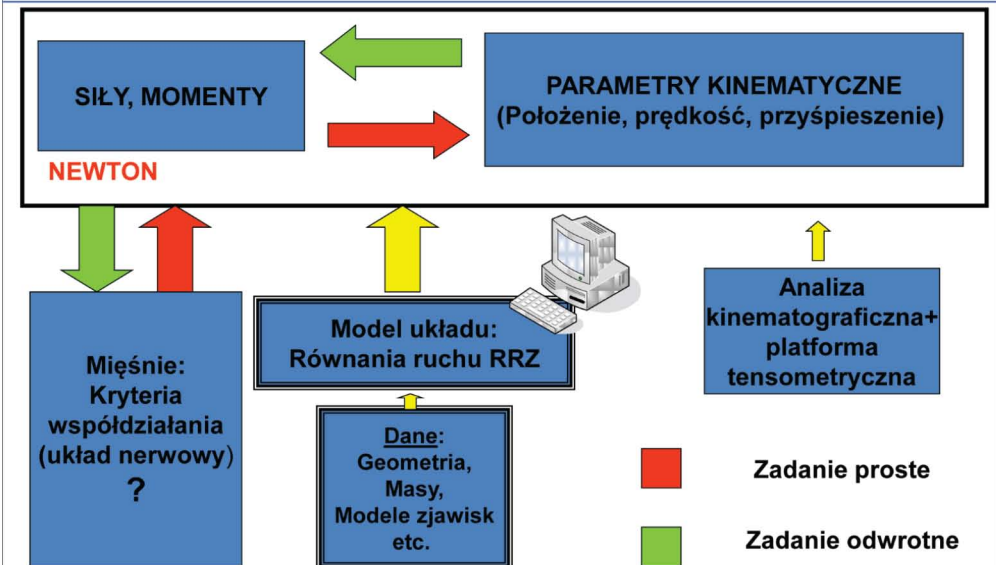
#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Przykład analizy z zastosowaniem modelu wirtualnego



#### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI

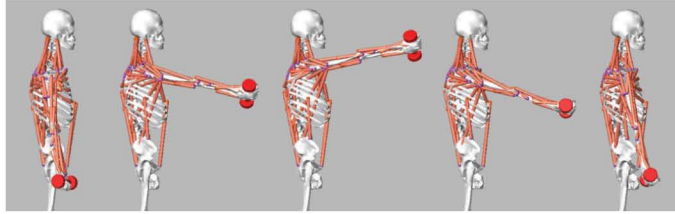


Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie

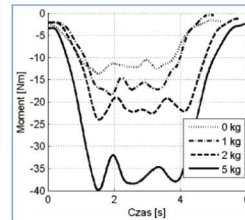
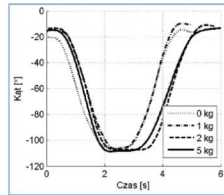


## Przykład - analiza zgięcia ramienia

Wyznaczenie wartości sił i pobudzeń mięśniowych przy zgięciu ramienia dla różnych wartości obciążenia trzymanego w dłoni (0, 1, 2 i 5 kg).



1. Na podstawie zadania odwrotnego wyznaczone zostały wartości przemieszczeń w stawie ramiennym w płaszczyźnie strzałkowej.



2. Na podstawie przemieszczeń w stawie zostały wyznaczone momenty netto dla każdego z obciążeń.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie

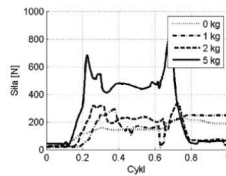
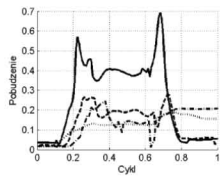


## Przykład - analiza zgięcia ramienia

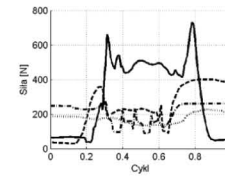
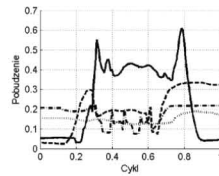
❖ Na podstawie wartości momentów netto w stawach oraz wyznaczonych parametrów kinematycznych mięśni przeprowadzona została optymalizacja kryterialna dla wszystkich mięśni modelu.

❖ Otrzymane wartości pobudzeń i sił dla mięśnia dwugłowego dla dwóch kryteriów

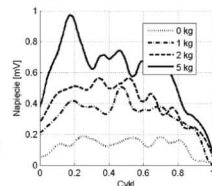
### k. łagodnego nasycenia



### kr.minimax



❖ W trakcie eksperymentu zarejestrowany został także przebieg sygnału EMG dla tegoż mięśnia dwugłowego.



### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Uwagi końcowe, źródła, piśmiennictwo

❖ Podstawowe źródło wykorzystanych informacji i materiału wyjściowego do ilustracji:

David A. Winter: Biomechanics and motor control of human movement, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2009.

❖ Warto zapoznać się z:

pełnym tekstem rozdz. 5 wymienionej wyżej książki.

❖ Wykorzystano również:

kilka slajdów z modułu: T8. *Współdziałanie mięśni* (M. Surowiec, C. Rzymkowski), opracowanego na potrzeby wykładu z przedmiotu *Wprowadzenie do biomechaniki*, MEiL PW, Warszawa 2015.

### WYBRANE ZAGADNIENIA METOD EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZENIOWYCH BIOMECHANIKI



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



## Dziękuję za uwagę



Wykład współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, udostępniany nieodpłatnie



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

