



**Daniel
Wdowicz**



**Dariusz
Bułka**

Model ciała człowieka CYBID Multibody Pieszy

Specyfikacja, generator modelu, prace badawcze nad rozwojem modelu

Streszczenie

Celem artykułu jest opis numerycznego, wielobryłowego modelu ciała człowieka CYBID Multibody Pieszy wprowadzonego w oprogramowaniu V-SIM 5.0. Przedstawiono założenia dla geometrii modelu oraz krótki opis działania generatora ciała człowieka. Omówiono pokrótce dodatkowe funkcjonalności rozwinięte w trakcie procesu wdrożenia modelu pieszego, m.in. interfejs skryptowy do programu V-SIM 5.0. oraz rozszerzone modele wspomagające analizę obrażeń. Przedstawiono także pokrótce kierunki dalszych prac badawczych na potrzeby rozwoju modelu.

Słowa kluczowe

Modelowanie numeryczne, obiekt wielobryłowy, piesi, biomechanika zderzeń, V-SIM, symulacja.

Otrzymano 26 września 2022 r., zatwierdzono do druku 25 listopada 2022 r.

DOI: 10.4467/15053520PnD.22.016.16986

1. Wstęp

Wielobryłowy model ciała człowieka CYBID Multibody Pieszy został opracowany w ramach realizowanego przez CYBID sp. z o.o. sp. k. projektu badawczego „Wielobryłowy model ciała człowieka do analizy wypadków drogowych” (POIR.01.01.01-00-0758/16). Model w wersji prototypowej został po raz pierwszy przedstawiony w 2021 r. na XVII Konferencji „Problemy Rekonstrukcji Wypadków Drogowych” w Zakopanem [1], a następnie został wdrożony jako nowa funkcjonalność w komercyjnym oprogramowaniu V-SIM 5.0, służącym do symulacji ruchu i zderzeń pojazdów.

Celem artykułu jest przedstawienie funkcjonalności ww. modelu wielobryłowego i krótkie omówienie już zrealizowanych oraz planowanych prac badawczo-rozwojowych w związku z dalszym rozwojem modelu.

Mgr inż. Daniel Wdowicz, Politechnika Wroclawska, CYBID sp. z o.o. sp. k., ORCID: 0000-0001-7334-8110; **mgr inż. Dariusz Bułka**, CYBID sp. z o.o. sp. k., ORCID: 0000-0003-4425-8217.

2. Budowa modelu

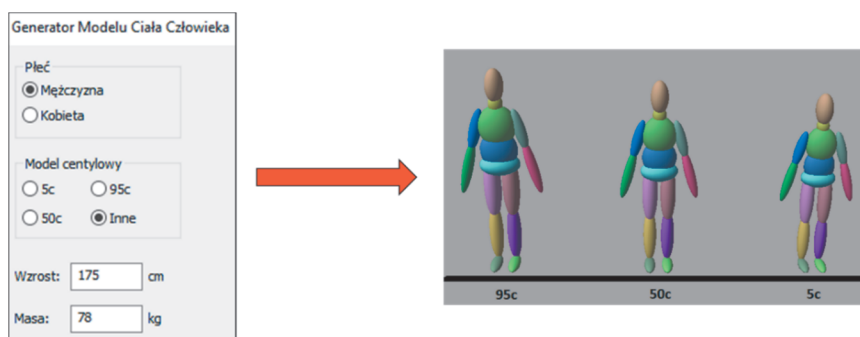
Podstawowe założenia dotyczące budowy modelu są następujące:

- ma postać trójwymiarowego, 15-członowego i wielobryłowego (inaczej: *multi-body*, MB) układu ciał sztywnych połączonych parami kinematycznymi,
- przedstawia dorosłego człowieka płci męskiej lub żeńskiej, preferowany jest osobnik polski,
- odnosi się do pieszego – z perspektywą innych zastosowań (np. kierowca, pasażer, upadki z wysokości).

Założenia te zostały w sposób szerszy opisane w publikacji [1].

2.1. Modele centylowe

CYBID Multibody Pieszcy może zostać wygenerowany przez wybór predefiniowanych zestawów parametrów wzrost/masa lub przez własnoręczne wpisanie ich wartości. Predefiniowane zestawy parametrów odpowiadają trzem osobnikom centylowym (5-, 50- i 95-centylowemu) obu płci. Centylowość modeli oznacza, że wzrost i masa wybranego modelu jest większa lub równa odpowiednio 5%, 50% i 95% liczby osobników populacji referencyjnej (ryc. 1).



Ryc. 1. Generator ciała człowieka w V-SIM 5.0. oraz wygenerowane trzy modele płci męskiej: 95-, 50- i 5-centylowy.

Geometria modelu została stworzona poprzez połączenie danych o osobnikach dwóch populacji:

- populacji polskiej z lat 90. XX wieku [5],
- populacji amerykańskich i niemieckich żołnierzy sił powietrznych z lat 70. XX wieku [2, 6].

Predefiniowane pary wzrost/masa odpowiadają osobnikom centylowym populacji polskiej. W praktyce rekonstrukcji, przy braku danych o wzroście i masie pieszego, umożliwia to użytkownikowi przeprowadzenie symulacji z modelem ekwiwalentnym do np. „przeciętnego polskiego mężczyzny” lub „drobnej polskiej kobiety”.

Warto odnotować, że w zależności od wykorzystywanych źródeł, 50-centylowy osobnik płci męskiej ma różny zestaw wzrostu i masy całkowitej w różnych programach lub zastosowaniach. Zestawienie różnic między wybranymi modelami centylowymi wymiarów przedstawiono w tabeli 1. Szczegółowe porównanie danych o osobnikach z populacji polskiej i amerykańsko-niemieckiej przedstawiono natomiast w tabeli 2.

Tabela 1. Przykładowe zestawienie danych antropometrycznych 50-centylowych osobników płci męskiej wg różnych producentów manekinów i modeli komputerowych.

Nazwa	Wzrost [cm]	Masa [kg]
Manekin Hybrid III 50M Pedestrian, Humanetics	170,4 ¹	78,5
Manekin PRIMUS, CTS	178	75,0
Model Pedestrian, MADYMO 7.5.	174	75,7
Model MB V-SIM 5.0.	175	78,0

Tabela 2. Zestawienie informacji o wzroście i masie osobników centylowych różnych populacji (przeciętnej polskiej oraz żołnierzy amerykańskich i niemieckich).

Populacja	Mężczyźni			Kobiety		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
Polska [5]	Wzrost [cm]					
	164,3	174,8	185,4	152,4	161,5	170,7
	Masa [kg]					
	60,0	78,0	99,0	50,0	65,0	88,0
Armie USA i Niemiec [2, 13]	Wzrost [cm]					
	168,1	178,4	188,6	152,37	161,97	172,15
	Masa [kg]					
	63,27	81,51	97,70	46,4	57,19	70,93

2.2. Geometria i parametry masowe

Dane geometryczne w publikacjach źródłowych były określone na bazie szczegółowej procedury pomiarowej, opisującej m.in. pozycję, w jakiej stał osobnik badany [2, 5, 6, 13]. Zestawiając dane z populacji polskiej oraz amerykańsko-niemieckiej, autorzy wielobryłowego modelu ciała człowieka w V-SIM zadbali o to, aby metody pozyskiwania wymiarów były takie same w obu publikacjach. Jeśli jakiś wymiar nie był określony dla jednej populacji, to duplikowano zestaw danych zmierzonych dla drugiej populacji.

¹ Znaczna różnica we wzroście manekina Hybrid III Pedestrian może wynikać z faktu, iż model Pedestrian jest *de facto* modelem Hybrid III Occupant (pasażer) ze zmodyfikowaną miednicą.

Geometria modelu dla każdej z płci jest tworzona na bazie 31 wymiarów antropometrycznych określonych dla sześciu osobników populacji referencyjnych (po trzech osobników dla każdej z populacji). Na podstawie tego zbioru danych wyznaczono liniowe równania regresji każdego z wymiarów geometrycznych. Jako zmienną niezależną w tych równaniach, przyjęto wzrost całkowity człowieka.

Wymiary antropometryczne pozwoliły na określenie wymiarów gabarytowych każdej z elipsoid ciała oraz na określenie położenia poszczególnych stawów. Przykładowo głębokość oraz szerokość talii pozwoliły na określenie dwóch z trzech wymiarów elipsoidy brzucha.

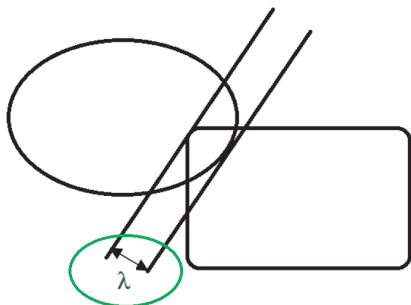
Dane o parametrach masowych poszczególnych członów ciała człowieka oparto na literaturze. Masy członów zostały wyliczone jako procent całkowitej masy ciała człowieka [3], zaś momenty bezwładności zostały wyliczone z opracowanych w literaturze przedmiotu równań regresji o następujących zmiennych niezależnych: wzroście i masie całkowitej [11, 17].

2.3. Model kontaktu

Algorytm kontaktu dla modelu CYBID Multibody Pieszy zaimplementowany w ostatecznej, komercyjnej wersji programu V-SIM 5.0. różni się od modelu zaprezentowanego we wcześniejszej publikacji [1].

2.3.1. Algorytm penetracyjny

Wcześniejszy algorytm opierał się na analizie wielkości głębokości penetracji, czyli koncepcji często stosowanej w dziedzinie symulacji wypadków drogowych [12, 16]. W chwili detekcji kontaktu, głębokość penetracji, wyrażana najczęściej w [m], jest wyliczana w każdym kroku jako odległość pomiędzy dwiema, równoległymi względem siebie, płaszczyznami stycznymi do przenikających się obiektów (ryc. 2). W trakcie jednego kroku symulacji, rozpatruje się wiele stycznych płaszczyzn równoległych do siebie – z matematycznego punktu widzenia, takich par płaszczyzn istnieje nieskończona liczba. Z tego zbioru par płaszczyzn ostatecznie wybierana jest taka para, dla której ich odległość względem siebie (czyli głębokość penetracji, oznaczona na ryc. 2 symbolem λ) jest najmniejsza.

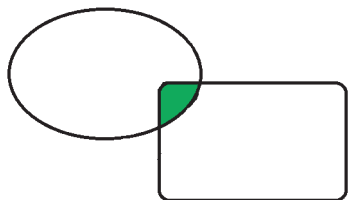


Ryc. 2. Wizualizacja algorytmu kontaktu „penetracyjnego”. Na zielono zaznaczono głębokość penetracji dwóch wzajemnie przenikających się ciał.

Uzyskana w ten sposób głębokość penetracji jest wówczas przemnażana przez bieżącą wartość sztywności (wyrażoną w $[N/m]$), w wyniku czego uzyskuje się chwilową wartość siły normalnej kontaktu. Wiele programów rekonstrukcyjnych przyjmuje wartość sztywności jako stałą dla danego członu² [12]. Istnieją jednak także silniki obliczeniowe przyjmujące tę wartość jako funkcję głębokości penetracji (w miarę postępu penetracji, zmienia się współczynnik sztywności i w rezultacie siła narasta w sposób nieliniowy w funkcji penetracji) [15].

2.3.2. Algorytm objętościowy

W trakcie prac rozwojowych nad modelem wielobryłowym w programie V-SIM 5.0, opisany w rozdziale 2.3.1. algorytm „penetracyjny” ostatecznie zastąpiono autorskim algorytmem, opisanym wstępnie w publikacji [1]. Nowy algorytm rozpatruje objętość wspólną dwóch wzajemnie przenikających się geometrii (ryc. 3). Wyliczona wielkość objętości wspólnej (wyrażona w $[m^3]$) jest przemnażana przez współczynnik sztywności (wyrażony w $[N/m^3]$), uzyskując tym samym chwilową wartość siły normalnej kontaktu.



Ryc. 3. Wizualizacja algorytmu „objętościowego”. Na zielono zaznaczono obszar objętości wspólnej dwóch przenikających się ciał.

Należy dodać, że współczynnik sztywności dla kontaktów modelu wielobryłowego w V-SIM 5.0 jest wyliczany jako średnia harmoniczna współczynników sztywności dwóch ciał biorących udział w kontakcie. Dzięki takiemu założeniu, w przypadku zderzenia z bardzo sztywnym obiektem, do analizy kontaktu wykorzystywany jest zasadniczo współczynnik sztywności ciała bardziej podatnego.

Wartość siły tarcia w kontakcie jest wyliczana w podobny sposób według obu algorytmów („penetracyjnego” oraz „objętościowego”), tzn. jako iloczyn współczynnika tarcia oraz wartości siły normalnej. Kierunek siły stycznej jest przyjmowany na bazie rzutu wektora prędkości względnej obu ciał na płaszczyznę styczną.

2.4. Reprezentacja geometryczna biorąca udział w kontakcie

W wielu programach istnieją różne sposoby reprezentacji geometrii biorącej udział w kontakcie. Najczęściej stosowane są elipsoidy lub hiperelipsoidy, często wykorzystywane razem z algorytmem „penetracyjnym”. Dla regularnego kształtu hiperelipsoidy można w sposób analityczny wyznaczyć płaszczyznę styczną w dowolnym punkcie. Dla kształtu elipsoidalnego zadaniem wymagającym dużego na-

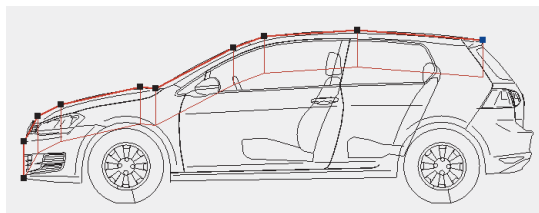
² Mówiąc precyzyjnie: wartość sztywności jest stała dla PARY członów – w wielu silnikach obliczeniowych wyliczana jest średnia ze sztywności obu ciał.

kładu obliczeń numerycznych staje się za to wspomiane wcześniej zagadnienie znajdowania par płaszczyzn stycznych równoległych do siebie. Hiperelipsoidy były i są dalej wykorzystywane zarówno do modelowania ciała człowieka, jak i pojazdów mechanicznych [4, 7].

Alternatywą dla modelowania kształtów pojazdów za pomocą hiperelipsoid jest dyskretyzacja geometrii pojazdu z wykorzystywaniem tzw. siatek *mesh* (prze-strzennych siatek wielokątów). Ten model geometrii kontaktowej jest wykorzystywany w programach wykorzystujących model kontaktu „penetracyjnego” [4, 15] (Dr. Steffan Datentechnik, 2013; Tass International, 2013). Każdy element siatki traktowany jest jako oddzielna sztywna płaszczyzna, z którą rozpatrywany jest kontakt hiperelipsoidy ciała człowieka. Przy takiej geometrii upraszcza się zagadnienie szukania pary równoległych płaszczyzn stycznych. Jako że w kontakcie bierze udział jedna znana płaszczyzna, to zagadnienie szukania „płaszczyzny stycznej do płaszczyzny” jest trywialne. Z drugiej strony, znacząco zwiększa się liczba elementów – płaszczyzn do rozpatrzenia, co w rezultacie może prowadzić do wydłużenia obliczeń.

Modelu kontaktu penetracyjnego wykorzystującego siatki *mesh* nie można mylić z modelem kontaktu MES, który bazuje na zupełnie innych założeniach niż opisywane tu powyżej modele kontaktów w układach wielobryłowych.

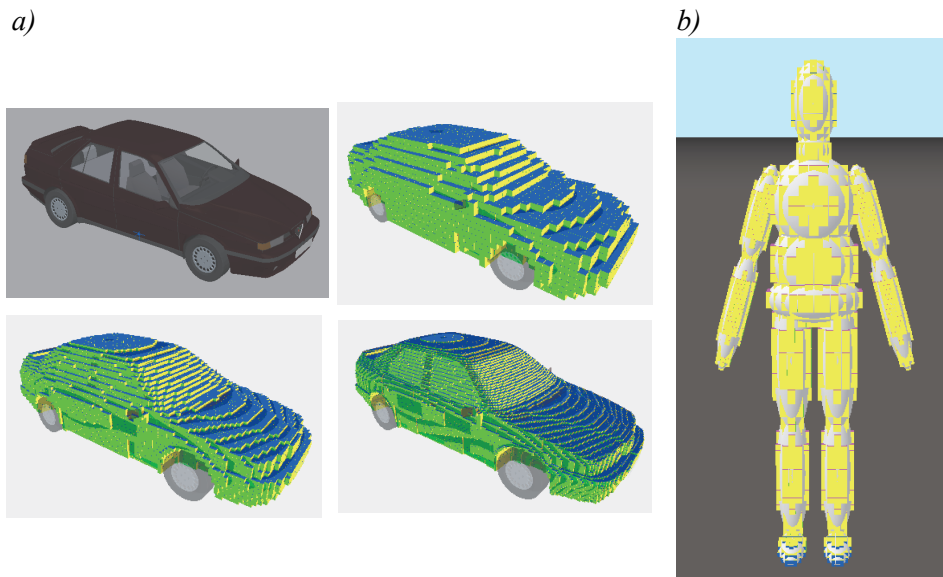
W prototypowej implementacji modelu CYBID Multibody Pieszy (w modelu „penetracyjnym”) geometrię pojazdu uzyskiwano poprzez dokonywany przez użytkownika podział nadwozia na równoległosciany (ryc. 4). Ściany równoległoscianów brały wówczas udział w zjawisku kontaktu z elipsoidami modelu człowieka.



Ryc. 4. Wizualizacja algorytmu dyskretyzacji geometrii pojazdu stosowanego we wstępnej implementacji modelu kontaktu układu wielobryłowego w V-SIM 5.0. – definiowanie brył (równoległoscianów) opisujących kształt nadwozia pojazdu na potrzeby analizy głębokości penetracji.

Powyższa metoda dyskretyzacji geometrii nadwozia podziału nie została ostatecznie wdrożona w komercyjnej wersji programu V-SIM 5.0. Procedura podziału geometrii na równoległosciany wymagała od użytkownika dodatkowej pracy, polegającej na obrysowaniu rzutu bocznego pojazdu kilkoma odcinkami. Znacznym ograniczeniem było także założenie o podziale geometrii na równoległosciany, co uniemożliwiało dokładne odwzorowanie geometrii zaokrąglonych powierzchni, przede wszystkim narożników przodu pojazdu.

Implementacja modelu kontaktu zastosowana ostatecznie w programie V-SIM 5.0, jak opisano w 2.3.2, jest oparta na algorytmie „objętościowym”. Na potrzeby obliczeń kontaktowych zarówno objętość pojazdu, jak i objętość elipsoid modelu człowieka jest dyskretyzowana poprzez podział na tzw. woksele (ryc. 5). Pozwala to na dokładniejsze odwzorowanie geometrii obiektów, w tym powierzchni zaokrąglonych. W miarę zmniejszania przez użytkownika wielkości wokseli, geometria obiektu jest dokładniej odwzorowywana, ale zwiększa się czas obliczeń.



Ryc. 5. Wizualizacja podziału objętości na woksele dla: a) sylwetki 3D nadwozia pojazdu (przedstawiono podział wokselowy 8 cm, 4 cm, 2 cm; b) wielobryłowego modelu ciała człowieka CYBID Multibody Pieszy.

W programie V-SIM 5.0 użytkownik może modyfikować wielkość woksela pojazdu, natomiast podział wokselowy objętości elipsoid modelu CYBID Multibody Pieszy jest przyjęty jako stały i niemodyfikowalny przez użytkownika.

Z punktu widzenia obsługi programu, w V-SIM 5.0. aktywacja kontaktu pojazdu z układami wielobryłowymi i zarazem dyskretyzacja jego objętości jest realizowana poprzez wybranie odpowiedniej reprezentacji nadwozia („Detekcja i analiza zderzenia z innymi pojazdami i przeszkodami”). Dyskretyzacji wokselowej może zostać poddana zarówno trójwymiarowa sylwetka uniwersalna pojazdu, jak i sylwetka rzeczywista³ istniejąca w bibliotece sylwetek pojazdów w V-SIM. Nie ma tym samym potrzeby korzystania z zewnętrznych baz siatek geometrii 3D po-

³ W programie V-SIM: sylwetka uniwersalna pojazdu – sylwetka typu np. „sedan”, „hatchback”, „SUV” dopasowana wymiarami do rozmiarów katalogowych konkretnego modelu pojazdu. Sylwetka rzeczywista pojazdu – sylwetka wiernie odwzorowująca geometrię pojazdu danej marki, modelu i rocznika; baza sylwetek rzeczywistych w V-SIM 5.0. jest regularnie rozwijana.

jazdów – użytkownik do kontaktu z układami wielobryłowymi korzysta z modeli pojazdów dostępnych w standardowej wersji programu.

Warto dodać, że w razie potrzeby skorzystania z dokładnej geometrii nadwozia pojazdu, który nie ma sylwetki „rzeczywistej” w bibliotece V-SIM 5.0, istnieje możliwość dodania takiej sylwetki przez producenta programu.

2.5. Stawy⁴ i ograniczenia ruchliwości w stawie

Zagadnienie ograniczenia ruchliwości w stawie zostało przybliżone już w publikacji [1]. W modelu wielobryłowym w V-SIM 5.0 stosowane są charakterystyki „kął – oporowy moment siły”, zadeklarowane oddzielnie dla każdego z trzech kierunków obrotu w stawach ciała. Charakterystyki są wieloliniowe, co umożliwia zadeklarowanie zakresów ruchu o różnym stopniu natężenia oporu. Ograniczeniem tej koncepcji jest fakt, iż wychylenie względem jednej osi nie wpływa na zakres ruchliwości względem pozostałych osi stawu. Charakterystyki są domyślnie zapisane w modelu i użytkownik nie musi ich wprowadzać własnoręcznie.

W toku prac badawczo-rozwojowych wprowadzono założenie, że wszystkie stawy w modelu ciała człowieka w V-SIM będą stawami kulistymi (tj. parami kinematycznymi o 3 obrotowych stopniach swobody), a wychylenie względem wybranych osi (np. ruch odwodzenia/przywodzenia w stawie kolanowym) będzie ograniczone przez charakterystyki oporu „kął – oporowy moment siły”. Doświadczenia innych badaczy wskazują, że taka implementacja może działać poprawniej niż wprowadzanie par kinematycznych stawów bazujące jedynie na intuicyjnie pojmowanej ruchliwości stawu w typowych sytuacjach. Przykładowo w publikacji [9] zasugerowano, że zamiana typu stawu kolanowego z „kulistego” na „przegub zawiasowy” (1 stopień swobody, obrotowy, na kierunku zgięciowym) w nowszych modelach wielobryłowych zastosowanych w programie PC-Crash (tj. modelu Pedestrian 20140221) spowodowała negatywny efekt. W symulacjach potrącenia pieszego z boku nie dochodziło bowiem do „oplatania się” kończyny dolnej względem nadwozia pojazdu i w rezultacie uzyskiwano stosunkowo mało realistyczne zachowanie modelu.

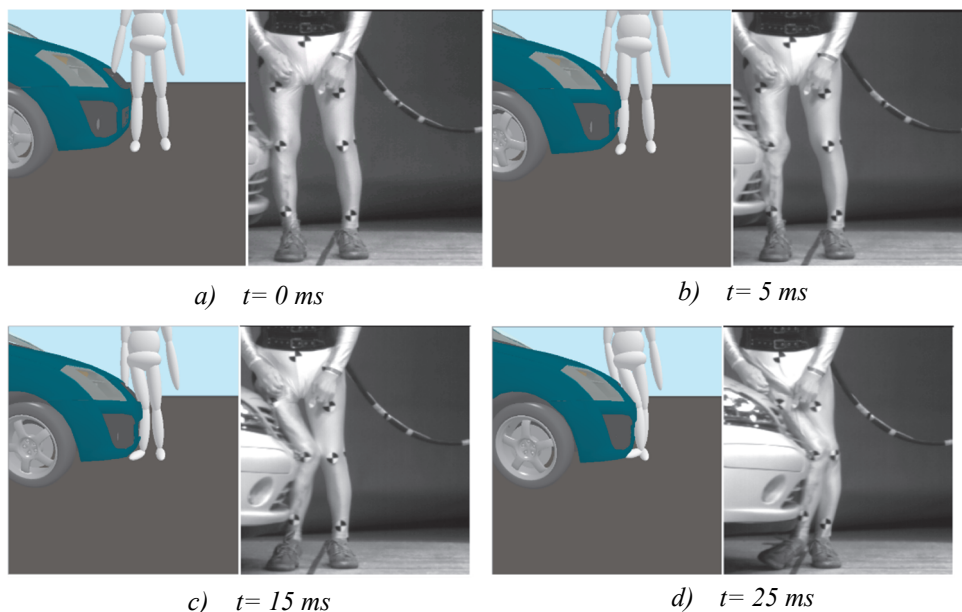
Warto odnotować, że w tym samym artykule [9] autorzy zaproponowali swój autorski model z udoskonalonymi ograniczeniami ruchu w stawie, zrealizowany w ramach silnika obliczeniowego PC-Crash. Ze względu na obliczenia silnika, autorzy nie mogli jednak zadawać różnych charakterystyk ograniczeń ruchu na różne kierunki tego samego stawu – „sztywność stawu” była zadawana jako stała dla wszystkich kierunków. Było to oczywiście problemem dla stawu takiego jak kolanowy, którego podatność zgięciowa znacznie różni się od podatności w kierunku

⁴ Należy podkreślić, że staw to pojęcie z dziedziny nauk medycznych, oznaczające ruchome połączenie kości. W dziedzinie teorii mechanizmów pojęciem bardziej precyzyjnym na połączenie ruchome między dwoma segmentami jest „para kinematyczna”. W bieżącym artykule dla uproszczenia autorzy w obu kontekstach posługiwali się będą wyłącznie słowem „staw”.

odwodzenia/przywodzenia. Obejściem zastosowanym przez autorów było zastąpienie stawu kulistego trzema prostopadłymi względem siebie stawami obrotowymi typu „zawias” oraz wstawienie między każdy z „zawiasów” ciało o znikomej masie (w celu zachowania integralności łańcucha kinematycznego kończyny dolnej). W rezultacie tego zabiegu, badacze dla każdego z kierunków mogli zadać oddzielną charakterystykę.

Takie obejście nie było konieczne w silniku obliczeniowym modelu wielobryłowego w V-SIM – podczas tworzenia modelu CYBID Multibody Pieszy charakterystyki oporu ruchu mogły zostać zadane oddzielnie dla każdego z kierunków stawu kulistego bez dodatkowych kroków.

W celu sprawdzenia zachowania modelu kończyny dolnej, w programie V-SIM 5.0.19 przeprowadzono symulację z modelem wielobryłowym na bazie francuskich badań zderzeniowych na zwłokach [10]. Symulacja zakładała potrącenie modelu pieszego z boku przez pojazd Citroen C2 (sylwetka rzeczywista) z prędkością 39,2 km/h. Analiza poklatkowa nagrań z testów na zwłokach oraz z symulacji (ryc. 6) wskazywała na prawidłowe zachowanie modelu kończyny dolnej w chwili potrącenia, jednak konieczne pozostają dalsze badania w tym temacie.

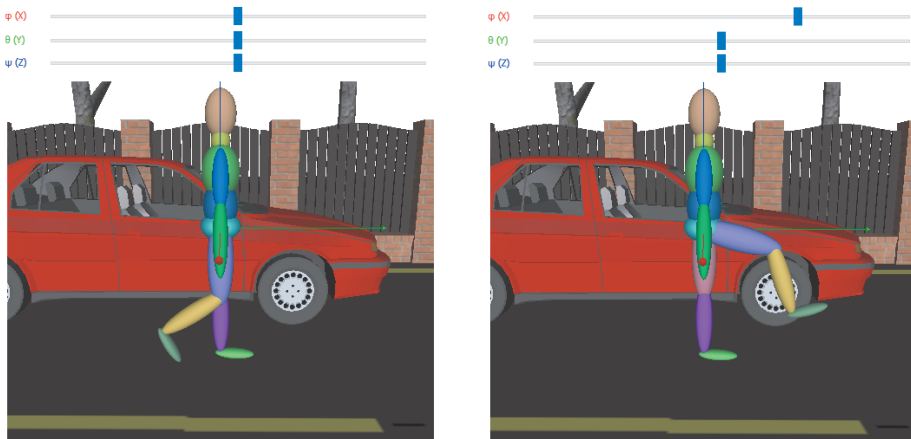


Ryc. 6. Porównanie klatak symulacji z V-SIM 5.0. z wynikami próby zderzeniowej na zwłokach [10].

3. Możliwości zmiany ustawienia sylwetki oraz prędkości modelu

Model Multibody posiada wbudowane w program narzędzie do dostosowywania położenia kątowych poszczególnych stawów ciała człowieka (tzw. pozer, od ang. *pose* – „poza”). Za pomocą suwaków, użytkownik może w łatwy sposób dostosować wychylenie stawu względem dowolnej z trzech osi.

W pozerze V-SIM założono, że wprowadzenie wychylenia kąтового nie powinno modyfikować wychyleń kątowych w innych stawach. Dzięki temu na przykład wprowadzając korekty wychyleń w stawie biodrowym nie będzie zmienione wychylenie kątowe w kolanie (ryc. 7).



Ryc. 7. Wizualizacja z okna pozera modelu wielobryłowego w programie V-SIM 5.0.47.0. Widoczne zachowanie zgięcia w stawie kolanowym w trakcie zginania w stawie biodrowym.

Warto odnotować, że pozer w V-SIM 5.0 oferuje podgląd manekina na tle aktualnej przestrzeni symulacji, co ułatwia ustawienie poszczególnych segmentów manekina względem innych elementów symulacji (pojazdów, elementów terenowych). Użytkownik nie musi więc zamykać okna pozera, by ocenić, czy wynik modyfikacji wychyleń wygląda realistycznie na tle reszty przestrzeni symulacji.

W programie V-SIM 5.0 wprowadzono możliwość nadania prędkości liniowej modelowi wielobryłowemu bezpośrednio korzystając z bazy danych literaturowych, co pozwala na zadawanie w wygodny sposób np. prędkości „normalny chód” osoby o określonej płci i wieku. Ustawienie prędkości dla modelu wielobryłowego nie modyfikuje pozy ani animacji ruchu (model nie pochyla się mając prędkość równą prędkości biegu oraz nie porusza kończynami w trakcie ruchu).

4. Dalsze prace nad modelem wielobryłowym

Utworzenie i przystosowanie do potrzeb komercyjnych modelu wielobryłowego pieszego było pierwszym etapem procesu wdrożenia zaawansowanych technik modelowania wielobryłowego w programie V-SIM 5.0. W dalszej części artykułu pokrótce opisane zostaną inne zagadnienia realizowane m.in. w ramach projektu „Wielobryłowy model ciała człowieka do analizy wypadków drogowych” (POIR.01.01.01-00-0758/16).

4.1. Prace wspierające analizę zachowania modelu pieszego

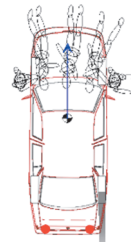
Wstępne wyniki walidacji modelu wielobryłowego pieszego, m.in. te przedstawione w [8], wskazywały na zgodność wyników symulacji z formułami literaturowymi określającymi relację odrzutu wzdłużnego z prędkością kolizyjną. Niewątpliwie jednak istnieje potrzeba uwiarygodnienia wyników drogą kompleksowej analizy wpływu różnych czynników na wyniki symulacji. Ponadto, wśród niektórych badaczy może pojawić się także potrzeba realizacji badań naukowych lub skomplikowanych analiz wypadków wykorzystując program V-SIM *stricte* jako *solver* obliczeniowy przyjmujący pewien liczbowy zestaw danych. Tym samym, aby ułatwić badania oraz zaawansowane analizy modelu, zostały wdrożone specjalne wersje programu V-SIM 5.0 z tzw. interfejsem skryptowym, dające możliwość tworzenia środowiska symulacji oraz wielokrotnego uruchamiania symulacji w pętli drogą skryptów programistycznych (ryc. 8). Użytkownik posiadający podstawową wiedzę z zakresu programowania ma tym samym możliwość w sposób zautomatyzowany np. zmieniać położenie modelu wielobryłowego względem przodu samochodu o 1 cm i dla każdej z symulacji zapisywać wyniki do pliku tekstowego (w celu dalszej obróbki w preferowanym programie, np. Microsoft Excel lub Matlab). Funkcjonalność ta zostanie szerzej opisana w kolejnych publikacjach.

a)

```
doc = vsim.GetActiveDoc()
mb = doc:AddMultibody("mbname")
doc:SetMaxSimulationTime(5.0)

for posx=1.0,1.0,0.2 do
mb:SetInitialPosition(posx,0.0)
doc:StartSimulation()
pos = doc:GetMultibodyPosition("mbname")
message = string.format("Final MB position is: %f %f\n", pos.X, pos.Y)
vsim.DisplayMessageBox(message)
end
```

b)

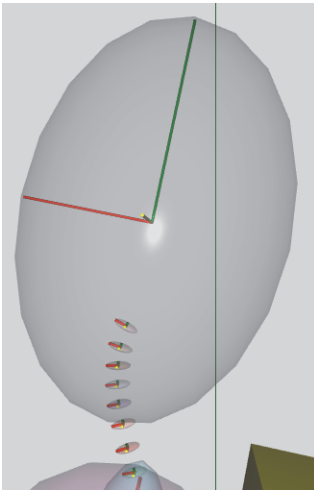


Ryc. 8. Interfejs skryptowy w V-SIM: a) Przykładowy skrypt programistyczny działający na aktywnym pliku projektu V-SIM 5.0; b) Koncepcyjna wizualizacja efektu działania skryptu programistycznego – skrypt może samodzielnie zmodyfikować położenie człowieka bez konieczności ręcznego wybierania poleceń z menu programu.

4.2. Nowe funkcjonalności obiektów wielobryłowych

W ramach wspomnianego już projektu „Wielobryłowy model ciała człowieka do analizy wypadków drogowych” rozpoznawano także możliwość stosowania modelu wielobryłowego ciała człowieka do innych zastosowań niż potrącenia pieszych.

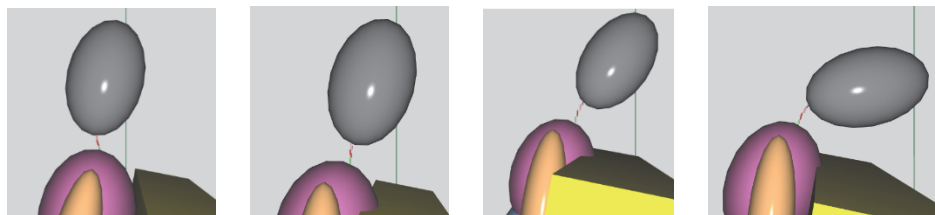
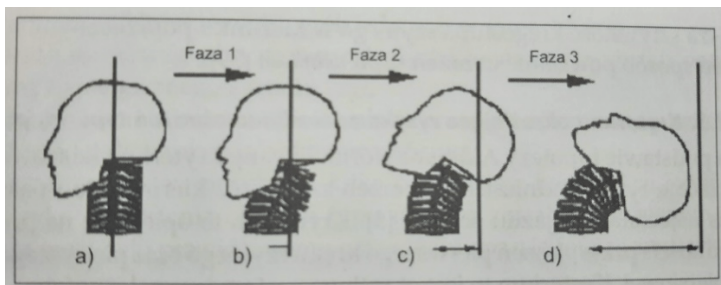
Jednym z tematów analizowanych przez deweloperów modelu wielobryłowego było zjawisko *whiplash*. W ramach projektu zaproponowano prototypowy model szyi, którego geometria zakładała m.in. wierne odwzorowanie położenia kręgów (ryc. 9). Kręgi tworzą dalej jeden łańcuch kinematyczny z resztą ciała, jednak mogą do pewnego stopnia swobodnie przemieszczać się względem siebie. Umożliwia to zamodelowanie takich zjawisk jak kompresja/rozciąganie odcinka szyjnego kręgosłupa lub przesunięcia tnące.



Ryc. 9. Wizualizacja prototypowego modelu szyi whiplash, opracowanego z wykorzystaniem silnika obliczeniowego CYBID V-SIM.

Ruch kręgów jest ograniczony za pomocą dwóch mechanizmów: obecności modeli mięśni zapewniających pasywną reakcję (na rozciąganie) oraz zastosowania nowego typu ograniczenia ruchu, wprowadzającego nie tylko moment oporu w zależności od kąta wychylenia, ale również siłę oporu w zależności od wzajemnego przesunięcia się dwóch członów względem siebie.

Wstępne symulacje najechania na pojazd od tyłu, przeprowadzone z prototypowym modelem szyi, wykazują wszystkie typowe fazy zjawiska *whiplash* opisywane w literaturze przedmiotu (ryc. 10). Model generuje także automatycznie wartości wskaźnika urazowego NIC, co może dodatkowo wspomóc analizy biomechaniczne. Obecnie rozpatrywane jest wdrożenie modelu w przyszłych wersjach programu V-SIM, wyposażonych w model ciała kierowcy/pasażera pojazdu.



Ryc. 10. Wstępne wyniki symulacji najechania od tyłu z prototypowym modelem szyi, porównane z fazami ruchu whiplash szyi [14].

W ramach prac wdrożeniowych rozpatrywane było także modelowanie zjawisk takich jak: zwicnięcie stawów, amputacje urazowe, złamania kości długich, zaawansowane modelowanie stawów. Dużym wyzwaniem dla osób modelujących ciało człowieka pozostaje zmienność osobnicza oraz brak danych np. o obciążeniach granicznych działających na ciało w trakcie amputacji. Chociaż w zakresie ww. funkcjonalności wymagane są dalsze prace badawczo-wdrożeniowe, to jednak tematyka modelowania i analizy zjawisk biomechanicznych w programie V-SIM pozostaje w obszarze zainteresowań autorów modelu wielobryłowego.

Wśród innych prac wdrożeniowych można wspomnieć także rozbudowę silnika obliczeniowego modelu wielobryłowego o możliwość modelowania par kinematycznych innego typu niż staw kulisty, m.in. stawu „zawiasowego” (1 stopień swobody – obrotowy) oraz stawu „swobodnego” (6 stopni swobody). Nowe pary kinematyczne nie zostały co prawda wprowadzone w standardowym modelu wielobryłowym, jednak posłużą one w przyszłości do modelowania innych obiektów jako układy wielobryłowe. Do takich układów zaliczyć można modele wielobryłowe jednośladow oraz środków transportu indywidualnego, np. hulajnogi, które wymagają stosowania pary kinematycznej obrotowej do modelowania ruchliwości kierownicy.

5. *Kierunki dalszych badań*

Dalszy rozwój modeli wielobryłowych ciała człowieka w programie V-SIM zakłada przeprowadzenie szeregu badań, m.in.:

- wdrożenia filtrowania sygnałów biomechanicznych, np. zgodnie ze standardami SAE J211,
- opracowania formuł w celu automatycznego obliczania przez program kryteriów urazowych (np. HIC, Nij) i opracowania badań odnoszących wartości liczbowe tych kryteriów do prawdopodobieństwa wystąpienia urazu,
- utworzenia modeli wnętrza pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem podatności fotela,
- utworzenia modeli środków komunikacji indywidualnej (np. roweru, hulajnogi elektrycznej) oraz badanie ich interakcji z modelem wielobryłowym,
- wprowadzenia animacji ruchu członów modelu wielobryłowym w zależności od zadawanej prędkości⁵,
- dalszą analizę zachowania modelu pieszego.

6. *Podsumowanie*

Model CYBID Multibody Pieszy jest dostępny w programie V-SIM 5.0 i może efektywnie wspomagać proces rekonstrukcji potrażeń pieszych przez biegłych i badaczy. Do cech wyróżniających model należą: oparcie geometrii i parametrów masowych na danych antropometrycznych (m.in. z populacji polskiej), wprowadzenie do modelu charakterystyk ograniczenia ruchu w stawach oraz autorski model kontaktu.

Obsługa modelu jest ułatwiona dzięki wbudowanym domyślnie w programie V-SIM 5.0. funkcjonalnościom, m.in. bibliotece sylwetek pojazdów do celów modelowania kontaktu nadwozia z pieszym, podglądowi na przestrzeń symulacji w oknie pozera czy bazie danych o prędkościach ruchu człowieka.

Model wielobryłowy w V-SIM pozostaje dalej wspierany i rozwijany, także w aspektach dotąd rzadko stosowanych w praktyce rekonstrukcji (np. w zagadnieniach odwzorowania mechanizmów powstawania obrażeń).

⁵ Warto nadmienić, że funkcjonalność ta została już zrealizowana dla starszej funkcjonalności programu V-SIM, tzw. pieszego kinematycznego, który jest animowaną sylwetką człowieka, wykorzystywaną w praktyce rekonstrukcji głównie do rozpatrywania możliwości uniknięcia potrażenia. W chwili kontaktu z pojazdem, symulacja ruchu pieszego kinematycznego jest zatrzymywana i nie rozpatrywane są zjawiska dynamiczne wynikające z uderzenia.

Bibliografia

- [1] Bułka, D., Wdowicz, D., Putanowicz, R., Kędziora, K. (2021). Nowy model wielobryłowy pieszcy do symulacji zderzeń. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny.
- [2] Clauser, C. E. (1972). *Anthropometry of air force women*. Aerospace Medical Research Laboratory, Aerospace Medical Division.
- [3] Dempster, W. T., Gaughran, G. R. L. (1967). Properties of body segments based on size and weight. *American Journal of Anatomy*, 120 (1), 33–54. <https://doi.org/10.1002/aja.1001200104>.
- [4] Dr. Steffan Datentechnik. (2013). *PC-Crash a Simulation Program for Vehicle Accidents. Operating and Technical Manual. Version 10.0*.
- [5] Gedliczka, A., Pochopień, P. (2001). *Atlas miar człowieka: dane do projektowania i oceny ergonomicznej: antropometria, biomechanika, przestrzeń pracy, wymiary bezpieczeństwa*. Centralny Instytut Ochrony Pracy.
- [6] Grunhofer, H. J., Kroh, G. (1975). *A Review of Anthropometric Data of German Air Force and United States Air Force Flying Personnel 1967-1968*.
- [7] Ishikawa, H., Kajzer, J., Schroeder, G. (1993). *Computer Simulation of Impact Response of the Human Body in Car-Pedestrian Accidents*. <https://doi.org/10.4271/933129>.
- [8] Kędziora, K. (2021). Nowy model wielobryłowy pieszcy do symulacji zderzeń. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny.
- [9] Kolla, E., Kohút, P. (2015). Virtual human body model for PC-Crash. *Proceedings of 24. EVU Conference, Edinburgh*.
- [10] Masson, C., Serre, T., Cesari, D. (2007). Pedestrian-Vehicle Accident: Analysis of 4 Full Scale Tests with PMHS. *20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration*, 07–0428.
- [11] McConville, J. T., Clauser, C. E., Churchill, T. D., Cuzzi, J., Kaleps, I. (1980). *Anthropometric relationships of body and body segment moments of inertia*.
- [12] Moser, A., Steffan, H., Kasanický, G. (1999). The pedestrian model in PC-crash – The introduction of a multi body system and its validation. *SAE Technical Papers*, 794–802. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0445>.
- [13] Naval Biodynamics Lab New Orleans LA. (1988). *Anthropometry and Mass Distribution for Human Analogues, Volume I. Military Male Aviators*.
- [14] Reza, A., Wierciński, J. (red.) (2011). *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
- [15] Tass International. (2013). *MADYMO Theory Manual, version 7.5*.
- [16] Van Wijk, J., Wismans, J., Maltha, J., Wittebrood, L. (1983). MADYMO pedestrian simulations. *SAE Technical Papers*. DOI: 10.4271/ 830060.
- [17] Young, J. W., Chandler, R. F., Snow, C. C., Robinette, K. M., Zehner, G. F., Loftberg, M. S., i inn. (1983). *Anthropometric and mass distribution characteristics of the adult female*.

* * *

CYBID Multibody Pedestrian model. Specification, human body generator, research and development of the model

Abstract

The aim of the article was to provide a thorough description of CYBID Multibody Pedestrian model in keeping with its implementation in the commercial version of V-SIM 5.0. reconstruction software. The description of the model geometry and the human body generator is provided together with a detailed explanation of the contact algorithm implemented in V-SIM 5.0. New functionalities including the script interface developed in the process of the pedestrian model implementation in V-SIM 5.0 and extended human body models supporting injury analysis are briefly discussed. Perspective for further development of Multibody models in future V-SIM versions is also presented.

Key words

Numerical modeling, multibody, pedestrians, impact biomechanics, V-SIM, simulation.