

Aktywny model ciała człowieka do rekonstrukcji wypadków przy pracy

Active human body model for reconstruction of occupational accidents

MARCIN MILANOWICZ
KRZYSZTOF KĘDZIOR *

Materiały z XX SKW PWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.163

W artykule opisano opracowany aktywny (uwzględniający ruchy człowieka) model ciała człowieka. Jako model bazowy wykorzystano numeryczny model ciała człowieka Madymo Pedestrian. Funkcje matematyczne opisujące przebieg kąta w czasie dla wybranych stawów są wykorzystywane do aktywacji modelu człowieka.

SŁOWA KLUCZOWE: aktywny model ciała człowieka, symulacja numeryczna, Madymo, rekonstrukcja wypadków

The article describes active human body model developed by authors. Madymo Pedestrian model was used as the base for an active model. Mathematical functions describing the movements of the selected human joints are used to activate human model.

KEYWORDS: active human body model, numerical simulation, Madymo, accident reconstruction

We współczesnych rekonstrukcjach wypadków bardzo często korzysta się z numerycznych modeli ciała człowieka. Modele te opracowywane są najczęściej na podstawie rzeczywistych manekinów ATD. Rzeczywiste manekiny muszą być na tyle wytrzymałe, aby nie ulegały uszkodzeniu w wyniku testu zderzeniowego, a ponadto muszą umożliwiać ocenę urazów jakich doznałby człowiek, gdyby był poddany takim samym obciążeniom. Wyposażone są one zatem w czujniki umożliwiające rejestrację różnych wielkości fizycznych, np. sił działających na poszczególne części ciała w trakcie testu zderzeniowego. Numeryczne modele ciała człowieka są również wyposażone w wirtualne czujniki. Pomiar tych wielkości jest niezbędny zarówno do wyznaczenia trajektorii poruszającego się ciała, jego prędkości i przyspieszeń, jak i do oszacowania urazów spowodowanych wypadkiem. Numeryczne modele ciała człowieka w zdecydowanej większości są pasywne, tzn. zachowują ogólną kinematykę człowieka, ale nie uwzględniają ruchów ciała wynikających z napięcia mięśni. Okazuje się, że reakcja człowieka podczas wypadku samochodowego ma bardzo istotny wpływ na trajektorię ciała uszkodzonego. W związku z tym pojawiła się potrzeba opracowania tzw. aktywnych modeli człowieka, które umożliwiają symulację ruchów wynikających z napięcia mięśni. Do najbardziej zaawansowanych należy opracowany przez firmę TASS International aktywny model ciała człowieka umożliwiający symulację reakcji człowieka podczas wywrócenia się samochodu [1]. Podobne problemy dostrzeżono w wyniku analizowania wypadków przy pracy. W artykule opisano opracowany w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB) aktywny model ciała człowieka, dzięki któremu możliwe jest uwzględnienie w rekonstrukcji wypadku ruchów (reakcji), jakie podczas zdarzenia wykonuje uszkodzony.

Metodyka

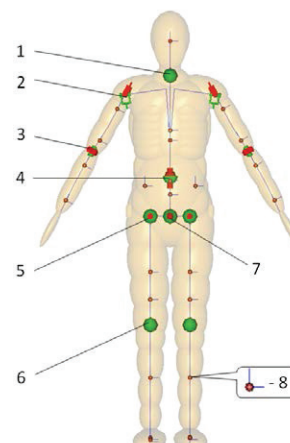
Do opracowania aktywnego numerycznego modelu ciała człowieka wykorzystano pakiet Madymo [2]. Jako model ba-

zowy wykorzystano numeryczny model ciała człowieka Pedestrian dostępny w bibliotece pakietu. Jest to model opracowany z wykorzystaniem metody układów wielocłonowych. Składa się z członów symulujących poszczególne części ciała człowieka. Członki połączone są ze sobą za pomocą par kinematycznych symulujących stawy człowieka. W pakiecie Madymo możliwe jest zadanie ruchu w połączeniu kinematycznym poprzez wprowadzenie funkcji opisującej przebieg kąta w czasie. Jest to tzw. wymuszenie kinematyczne. Funkcjonalność tę wykorzystano do symulowania ruchu w aktywnym modelu człowieka. Aby w modelu uwzględnić reakcję człowieka, do wybranych połączeń symulujących stawy człowieka wprowadza się funkcje opisujące ruch ciała człowieka zawierające informacje o wartościach kątów w danej chwili czasowej mierzonej w poszczególnych stawach człowieka. W celu opracowania funkcji opisujących te ruchy przeprowadzono badania z udziałem ochotników, które symulują w kontrolowanych warunkach ruchy człowieka podczas wypadku. Uzyskane dane wykorzystywane są do modelowania ruchu w połączeniach modelu Pedestrian symulujących stawy.

Opracowanie aktywnego modelu ciała człowieka

■ Budowa aktywnego modelu ciała człowieka

Jak wspomniano, w pakiecie Madymo możliwe jest zadanie ruchu w połączeniach kinematycznych. Jednak zastosowanie tego rozwiązania bezpośrednio w połączeniach numerycznego modelu ciała człowieka spowoduje, że zablokowana zostanie możliwość uwzględnienia dynamiki modelu. W efekcie model taki nie będzie się nadawał do zastosowania w analizach biomechanicznych, a odwzoruje jedynie zadany ruch. Dzieje się tak z uwagi na ograniczenia obliczeniowe solvera Madymo. Aby rozwiązać ten problem, zastosowano nietypową procedurę wykorzystania modelu numerycznego z pakietu Madymo. Opracowano model kinematyczny układu ruchu człowieka (zwany dalej modelem układu ruchu) o wymiarach identycznych do wymiarów numerycznego modelu ciała człowieka z pakietu. Wszystkie połączenia w modelu układu ruchu odpowiadają połączeniom numerycznego modelu ciała człowieka (rys. 1).



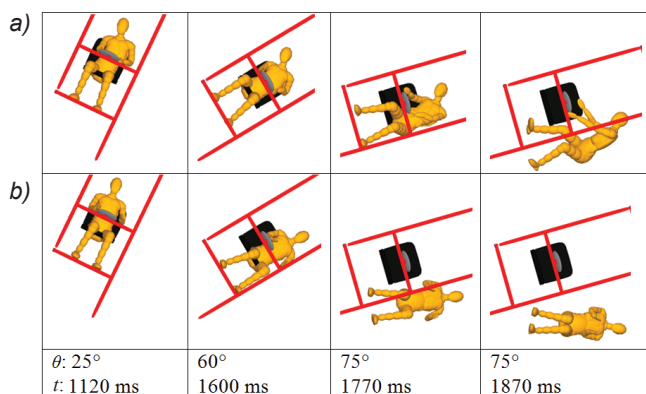
Rys. 1. Model układu ruchu sprzężony numerycznie z numerycznym modelem ciała człowieka. 1÷6 – połączenia umożliwiające zadanie ruchu obrotowego w stawach: 1 – międzykręgowym T1-C7, 2 – ramiennym, 3 – łokciowym, 4 – międzykręgowym T11-T10, 5 – biodrowym, 6 – kolanowym; 7 – połączenie umożliwiające zadanie ruchu obrotowego miednicy; 8 – jedno z 30 połączeń point restraint łączących model układu ruchu i ciała człowieka.

* Dr inż. Marcin Milanowicz (marmi@ciop.pl); prof. dr hab. inż. Krzysztof Kędzior (krked@ciop.pl) – Centralny Instytut Ochrony Pracy, Państwowy Instytut Badawczy

Opracowany model układu ruchu połączono (sprzężono numerycznie) z modelem ciała człowieka za pomocą 30 połączeń typu *point restraint*. Połączenia tego typu symulują siły sprężystości i tłumiącą w pewnym punkcie przymocowanym do danego ciała. Połączenia usytuowano na kończynach górnych i dolnych, głowie, szyi oraz tułowi modelu człowieka (rys. 1) [2]. Poruszający się model kinematyczny „napędza” numeryczny model ciała człowieka dzięki funkcjom opisującym ruch.

■ Model do rekonstrukcji przewracającego się wózka jezdniowego

Zdarzenie polegające na przewróceniu się wózka jezdniowego wraz z operatorem jest jednym z najczęstszych i najniebezpieczniejszych wypadków z udziałem wózków. Odtworzenie zachowania operatora w momencie przewracania jest bardzo istotne z punktu widzenia rekonstrukcji tego zdarzenia. Do opracowania funkcji opisujących ruchy operatora skorzystano z wyników badań przeprowadzonych w INRS (Institute National de Recherche et de Securite) we Francji [3]. Ochotnicy biorący udział w badaniu wykazywali tendencję do odchylenia tułowia i głowy w przeciwnym kierunku do kierunku przechylającej się kabiny. Aby odtworzyć te ruchy, w aktywnym modelu człowieka zastosowano dwie funkcje zmiany kąta w czasie dla stawów międzykręgowych kręgosłupa pomiędzy kręgami T11-T10 i T1-C7. Funkcje symulują obroty w płaszczyźnie czołowej. Parametry każdej z funkcji to wartość kąta zgięcia danego stawu międzykręgowego i czas trwania tego zgięcia. Podczas symulacji przewracającego się wózka jezdniowego funkcje opisujące ruch aktywnego modelu człowieka uruchamiane są w momencie, kiedy wózek zaczyna tracić stateczność przy pokonywaniu zakrętu. Połączenia typu *point restraint*, łączące model układu ruchu z numerycznym modelem ciała człowieka, są wyłączane tuż przed uderzeniem i dalszy ruch modelu człowieka nie uwzględnia żadnych wymuszonych ruchów.



Rys. 2. Porównanie wyników symulacji w formie animacji dla modelu aktywnego (a) i modelu pasywnego (b). θ – kąt wychylenia kabiny; t – czas liczony od momentu uruchomienia przechylania kabiny

W celu symulacji chwytu rąk za kierownicę zastosowano połączenia typu *restraint point* pomiędzy modelami: ręki lewej/prawej i kierownicy. W trakcie przechylania kabiny ręce trzymają kierownicę do momentu, kiedy przekroczona zostanie siła, przy której człowiek nie jest już w stanie się utrzymać i puszcza kierownicę. W modelu po przekroczeniu wartości tej siły połączenia są wyłączane, symulując w ten sposób puszczenie kierownicy. Podobne rozwiązanie zastosowano w celu symulacji utrzymania miednicy człowieka w fotelu. Na rys. 2 przedstawiono porównanie przewracającego się wózka z uwzględnieniem opracowanego aktywnego modelu ciała człowieka (a) i bez uwzględnienia aktywacji (b).

■ Model do rekonstrukcji upadku z wysokości

Aktywny model do rekonstrukcji upadku odwzorowuje ruchy człowieka będące skutkiem załamania się czynnika materialnego, np. świetlika dachowego lub belki załamującej się pod kończynami dolnymi człowieka. Jest to jedna z najczęstszych przyczyn upadku z wysokości [4]. W celu opracowania funkcji opisujących te ruchy przeprowadzono badania eksperymentalne z udziałem ochotników [5]. Badania polegały na symulowaniu pierwszych chwil upadku z wysokości w kontrolowanych warunkach (wysokość upadku: 0,4 m). Na podstawie wyników badań opracowano 14 funkcji opisujących ruch upadającego człowieka. Funkcje zadano ośmiu połączeniom odpowiadającym następującym stawom człowieka: stawy ramienne, stawy biodrowe, stawy kolanowe, stawy międzykręgowe kręgosłupa pomiędzy kręgami T11-T10.

W momencie uruchomienia symulacji upadku z wysokości na model ciała człowieka działa pole grawitacyjne i równocześnie uruchamiany jest model układu ruchu napędzający model ciała człowieka. Funkcje opisują ruch przez pierwsze 40÷65 ms (w zależności od osoby badanej rejestracja upadku z wysokości 0,4 m trwała od 40 do 65 ms). Po upływie tego czasu połączenia typu *point restraint*, łączące model układu ruchu z numerycznym modelem ciała człowieka, również przestają działać i dalszy upadek nie uwzględnia już żadnych wymuszonych ruchów.

Podsumowanie

Opracowano aktywny numeryczny model ciała człowieka wspomagający rekonstrukcję wypadków przy pracy. Dzięki temu udoskonalono metodę teoretyczną badania skutków wypadków poprzez uwzględnienie reakcji człowieka na zdarzenie wypadkowe. Uwzględnienie tych ruchów przyczynia się do zwiększenia dokładności procesu rekonstrukcji wypadku oraz skraca czas potrzebny na jej przeprowadzenie. Ruch modelu aktywnego jest odtwarzany na podstawie badań z udziałem ochotników. Dzięki takim badaniom ekspert zajmujący się rekonstrukcją ma informację o rzeczywistym a nie tylko teoretycznym zachowaniu się ciała człowieka podczas danego zdarzenia wypadkowego. Na obecnym etapie aktywny model człowieka ma możliwość symulacji wypadku polegającego na przewracaniu się wózka jezdniowego wraz z operatorem oraz upadku z wysokości spowodowanego załamaniem się czynnika materialnego pod kończynami dolnymi. Jednakże, możliwe jest poszerzenie jego funkcjonalności na inne rodzaje wypadków.

* * *

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014÷2016 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

1. Meijer R., Rodarius C., Adamec J., van Nunen E., van Rooij L. „A first step in computer modelling of the active human response in a far-side impact”. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 13 (6), 2008, pp. 643÷652.
2. TASS International. „*Madymo*”. Dostęp: 1.03.2016, pod adresem: www.tassinternational.com/madymo.
3. Rebelle J. „Use of a modified HYBRID III 50th dummy to estimate the effectiveness of market restraint systems for forklift truck drivers”. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 20, No. 4, pp. 348÷369, Jul. 2015.
4. Dąbrowski A. „Prace na wysokości – najczęstsze przyczyny wypadków”. *Bezpieczeństwo Pracy – nauka i praktyka*, Nr 1, 2004, pp. 2÷6.
5. Milanowicz M., Budziszewski P., Kędzior K. „Experimental study of the loss of balance process before falling from a height”. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. Vol. 18, No. 1, 2016. DOI: 10.5277/ABB-00214-2014-03.