MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
41, s. 445-452, Gliwice 2011

DOŚWIADCZALNE METODY WYZNACZANIA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH GŁOWY I KRĘGOSŁUPA SZYJNEGO CZŁOWIEKA

WOJCIECH WOLAŃSKI, PAWEŁ POTKOWA, DAGMARA TEJSZERSKA

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: wojciech.wolanski@polsl.pl

Streszczenie. W prezentowanej pracy przedstawiono doświadczalne metody wyznaczania wielkości kinematycznych głowy i kręgosłupa szyjnego. Etap pierwszy badań pozwolił na określenie przemieszczeń kręgów odcinka szyjnego kręgosłupa w warunkach in vivo, podczas wykonywania ruchów głową. Do rejestracji ruchu zastosowano radiografię cyfrową, zaś do obróbki wyników i ilościowego oszacowania parametrów ruchu posłużył system APAS (Ariel Performance Analysis System). Badanie umożliwiło uzyskanie informacji o położeniach kręgów przy różnym usytuowaniu głowy, jak również wzajemnych rotacji sąsiadujących segmentów. Przeprowadzona wszechstronna analiza czynnościowa stanowi podstawę do identyfikacji i zdefiniowania parametrów kinematycznych opisujących wzorce ruchowe kręgosłupa. Drugi etap badań obejmował eksperymenty wykonywane z udziałem ochotników przy wykorzystaniu specjalnego urządzenia do symulacji wpływu uderzenia pojazdu w nieruchomą przeszkodę na kinematykę głowy. Tym razem do rejestracji wielkości kinematycznych wykorzystano system kamer firmy BASLER rejestrujących obraz z dużą częstotliwością oraz aparatury do pomiaru przebiegów czasowych przyspieszeń składającej się z analizatorów SigLab i zestawu akcelerometrów. Analiza wyników pomiarów pozwoliła na wyznaczenie parametrów kinematycznych rozpatrywanych punktów głowy i tułowia podczas wymuszenia wywołanego gwałtownym zatrzymaniem. Wyniki badań wykorzystane zostaną w przyszłości jako dane wejściowe i posłużą do weryfikacji modelu do analizy dynamiki głowy i kręgosłupa szyjnego sformułowanego w środowisku LS-DYNA.

1. WSTĘP

Kręgosłup jest najbardziej złożonym pod względem anatomii i kinematyki zespołem stawowym w całym układzie szkieletowym człowieka. Odcinek szyjny, ze względu na brak dodatkowej ochrony (inne odcinki przebiegają w tułowiu, a więc są dodatkowo chronione przez te części ciała) jest najbardziej podatny na wszelkiego rodzaju urazy i wynikające z nich problemy zdrowotne. W granicach odcinka szyjnego może dochodzić do przeciążeń powstałych w wyniku zarówno długotrwałych i cyklicznych obciążeń nie przekraczających granicy wytrzymałości struktur kostnych kręgosłupa, jak i doraźnych, mających charakter

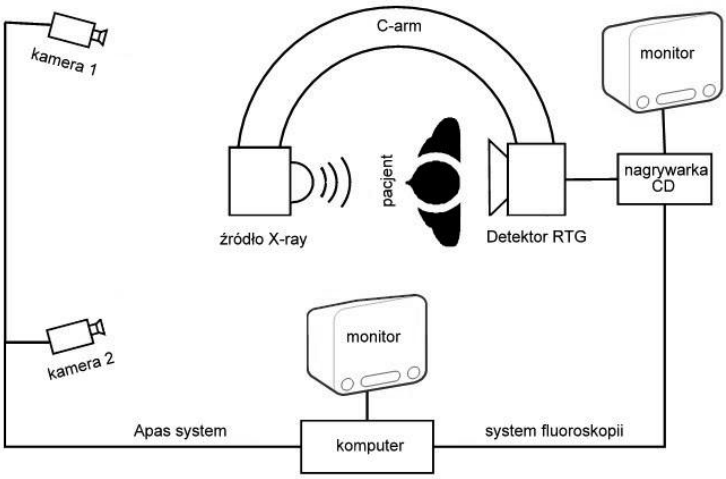
impulsowych przeciążeń mogących zniszczyć fragment kręgosłupa [1, 3]. Przyczyną stanu takiej rzeczy jest pełniona przez kręgosłup szyjny funkcja podpory głowy. Duża masa skupiona w głowie i oparta na delikatnej strukturze kręgów szyjnych zachowuje się jak odwrócone wahadło. Taki układ posiada wielką bezwładność, a co za tym idzie występują w nim wielkie siły dynamiczne. W celu identyfikacji obciążeń działających na struktury kręgosłupowe prowadzi się szereg badań. Pozyskiwanie takich informacji o organizmach żywych stanowi szczególną trudność, gdyż wiarygodne dane uzyskać można na drodze badań doświadczalnych przy użyciu preparatów anatomicznych, które ponadto, celem uśrednienia wyników, należy przeprowadzać na większej liczbie przypadków. Ze względu na charakter tego rodzaju badań są one dopuszczalne jedynie dla jednostek wykwalifikowanych w tej dziedzinie i posiadających zgodę Komisji Etyki. Alternatywą są badania modelowe oparte na technikach komputerowych [4]. Wymagają one jednak dokładnej znajomości budowy badanego obiektu, jego własności materiałowych oraz szeregu innych informacji niezbędnych do prawidłowego sformułowania i weryfikacji zadania obliczeniowego. Pomimo wielu badań prowadzonych w różnych ośrodkach badawczych zajmujących się wyznaczaniem charakterystyk biomechanicznych [2] wiedza o zjawiskach fizycznych zachodzących w kręgosłupie szyjnym jest wciąż niepełna. Nadal więc istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań dotyczących wyznaczania biomechanicznych własności kręgosłupa człowieka pod wpływem obciążeń fizjologicznych. Dlatego w niniejszej pracy za główny cel badań przyjęto wyznaczenie wielkości kinematycznych głowy i kręgosłupa szyjnego człowieka podczas różnych wymuszeń ruchu. W badaniach wykorzystano dwie doświadczalne metody wyznaczania charakterystyk kinematycznych opartych na rentgenografii cyfrowej i wideorejestracji. Umożliwiły one analizę wielkości kinematycznych głowy i kręgów szyjnych przy wymuszeniu siłami mięśniowymi oraz głowy i tułowia podczas wypadków samochodowych w zakresie bezpiecznych prędkości

2. ANALIZA WIELKOŚCI KINEMATYCZNYCH GŁOWY I KRĘGOSŁUPA SZYJNEGO

2.1. Analiza kinematyczna kręgosłupa szyjnego przy użyciu rentgenografii cyfrowej

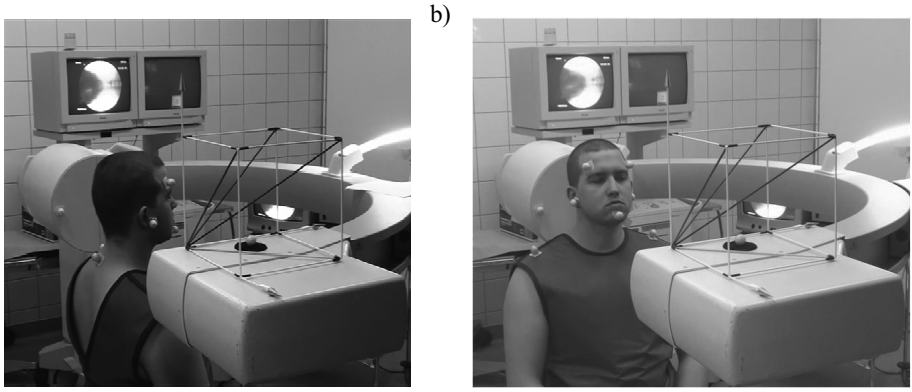
Badania przy użyciu rentgenografii cyfrowej posłużyły do identyfikacji wzorców ruchowych odcinka szyjnego w warunkach in vivo, tj. kinematyki ruchu poszczególnych kręgów wraz z dokładnym określeniem ich trajektorii, wzajemnych pozycji oraz rotacji. Rozbudowany system rejestrujący schematycznie przedstawiono na rys.1. Takie stanowisko badawcze daje możliwość kompleksowej analizy kinematycznej głowy i kręgosłupa szyjnego. Aby uzyskać pełen obraz zachowania kręgów szyjnych podczas ruchu wymuszonego siłą mięśni, były nagrywane sekwencje filmowe w postaci obrazów rentgenowskich. Do badań wykorzystano aparaturę Philips Mobile C-arm Systems BV Pulsera, która pozwalała na rejestrację obrazu z częstotliwością 30 klatek na sekundę (rys. 2). Pobrane dane analizowano za pomocą systemu APAS (Ariel Performance Analysis System). Dodatkowo podczas badań może być również wykorzystana metoda wideorejestracji.

Dzięki interdyscyplinarnej współpracy naukowców z Katedry Mechaniki Stosowanej z lekarzami i pracownikami ośrodków medycznych powstała możliwość prowadzenia własnych badań eksperymentalnych. Badania prowadzono wśród pacjentów Kliniki Neurochirurgii Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach, gdzie rutynowo diagnozuje się wiele osób z problemami neurologicznymi. Grupa pacjentów obejmowała osoby, które z różnych powodów poddawane były diagnostycznym badaniom czynnościowym, a których wyniki nie potwierdziły stanów patologicznych.



Rys.1. System do analizy kinematyki głowy i kręgosłupa szyjnego

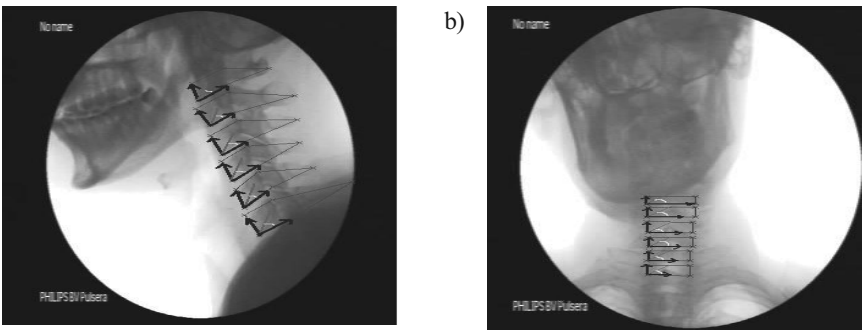
a) b)



Rys. 2. Projekcja z wykorzystaniem rentgenografii cyfrowej w płaszczyźnie:
a) strzałkowej, b) czołowej

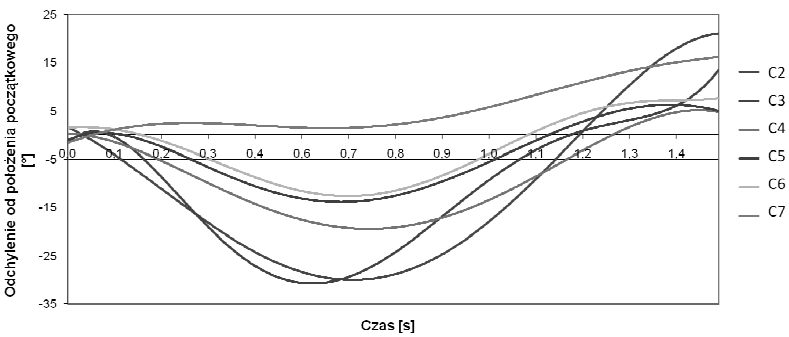
Zaproponowana metoda badania pacjentów integrująca system fluoroskopii z systemem APAS pozwala określić przemieszczenia kręgów w rzeczywistym czasie podczas wykonywania ruchów głową. W ten sposób możliwe jest uzyskanie ścisłych informacji o położeniach kręgów przy różnym usytuowaniu głowy, jak również rotacje jednego segmentu względem drugiego. Na pojedynczych klatkach filmów zarejestrowanych przez rentgenograf cyfrowy wprowadzanych do programu APAS zaznaczano położenia poszczególnych kręgów. Każdy kręg określano w programie w formie wielokąta opartego na charakterystycznych punktach kręgu. W przypadku płaszczyzny strzałkowej oznaczano pięć punktów charakterystycznych tworzących pięciobok, zaś w przypadku płaszczyzny czołowej cztery tworzące prostokąt (rys 3). Następnie na podstawie analizy ruchu pomiędzy poszczególnymi klatkami wyznaczano wzajemne położenia poszczególnych kręgów. Z uwagi na ograniczoną widoczność kręgu C1 (zwłaszcza w płaszczyźnie czołowej) analizę przeprowadzono dla odcinka C2–C7. Analiza pozwoliła na ilościowe oszacowanie parametrów ruchu.

a) b)

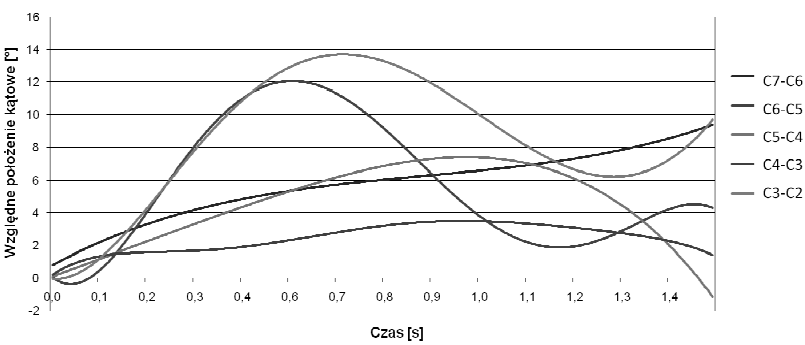


Rys. 3. Układ punktów pomiarowych podczas projekcji ruchu kręgów: a) w płaszczyźnie strzałkowej, b) w płaszczyźnie czołowej

Położenia kątowe kręgów podczas ruchu głowy w płaszczyźnie strzałkowej oraz czołowej pokazano na charakterystykach załączonych (rys.4, rys.5). Rysunek 4 przedstawia odchylenia kręgów od położenia początkowego podczas pełnego cyklu ruchu skłonu oraz przeprostu odcinka szyjnego kręgosłupa. Wartości ujemne kątów na wykresie obrazują obrót kręgów w przód, a wartości dodatnie – w tył. Względne położenia kątowe kręgów pokazano na rys. 5.

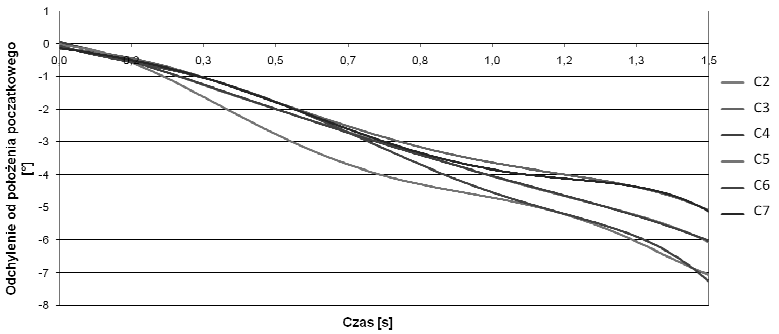


Rys. 4. Przemieszczenia kątowe kręgów podczas ruchu głowy w płaszczyźnie strzałkowej

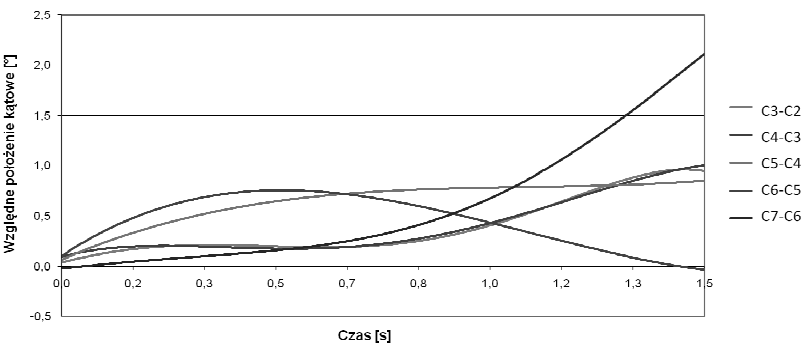


Rys. 5. Względne położenia kątowe kręgów podczas ruchu głowy w płaszczyźnie strzałkowej

Załączone charakterystyki (rys.6, rys.7) przedstawiają położenia kątowe kręgów odcinka szyjnego przy bocznym zginaniu w płaszczyźnie czołowej. Rysunek 6 przedstawia odchylenia kątowe poszczególnych kręgów od położenia początkowego, a rysunek 7 względne położenia kątowe pomiędzy poszczególnymi kręgami.



Rys. 6. Przemieszczenia kątowe kręgów podczas ruchu głowy w płaszczyźnie czołowej

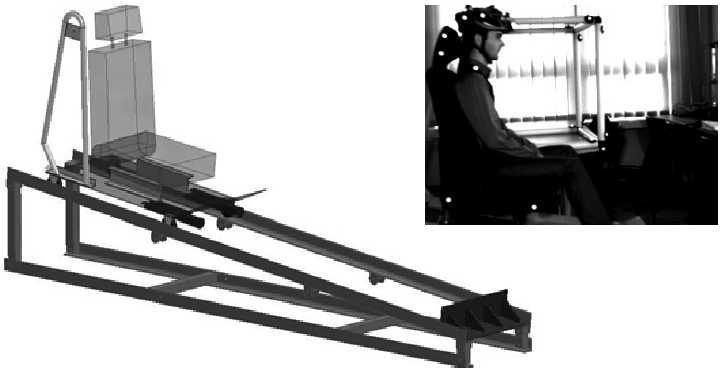


Rys. 7. Względne położenia kątowe kręgów podczas ruchu głowy w płaszczyźnie czołowej

2.2. Analiza kinematyczna głowy podczas testów zderzeniowych na ochotnikach

Do analizy wielkości kinematycznych głowy oraz tułowia podczas testów zderzeniowych na ochotnikach w zakresie bezpiecznych prędkości zaproponowana metodę łączącą wideorejestrację z systemem APAS. Rejestracja ruchu odbywała się poprzez zestaw czterech kamer cyfrowych firmy BASLER o częstotliwości 200 Hz rejestracji obrazu. Badania wykonywane były na stanowisku pomiarowym do testów zderzeniowych na ochotnikach (rys. 8), które umożliwia regulację kąta nachylenia względem podłoża w zakresie 0° - 12°. Przy maksymalnym nachyleniu można uzyskać prędkość najazdu wynoszącą ok. 10 km/h. Fotel wyposażony był w bezwładnościowe pasy bezpieczeństwa, aby nie narażać ochotników na urazy. Układ punktów pomiarowych składał się z 13 znaczników zlokalizowanych na:

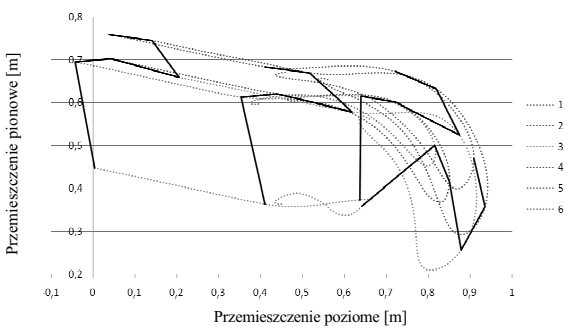
- kasku (5 znaczników),
- tułowiu (4 znaczniki),
- fotelu (4 znaczniki).



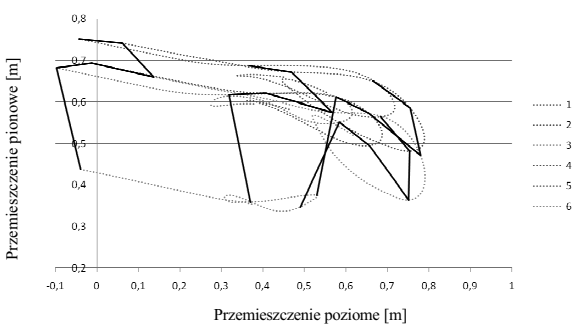
Rys. 8. Schemat stanowiska pomiarowego do analizy wielkości kinematycznych głowy podczas testów zderzeniowych na ochotnikach

Uzyskane dane na podstawie wideorejestracji poddano analizie w programie APAS. Dzięki temu zostały wyznaczone wielkości kinematyczne głowy obejmujące przemieszczenia, prędkości, przyspieszenia oraz trajektorie ruchu. Dla przykładu na rys. 9 przedstawiono otrzymane przemieszczenia głowy i tułowia dla dwóch ochotników podczas testów zderzeniowych przy nachyleniu podłoża równym 12° i prędkości najazdu wynoszącej 10 km/h.

a)



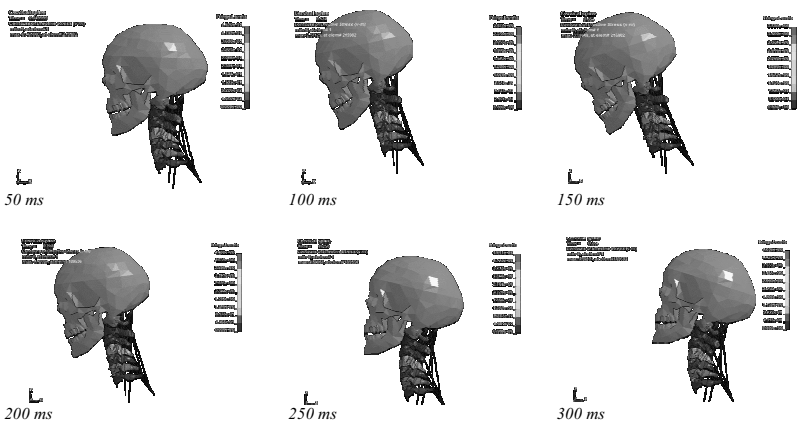
b)



Rys. 9. Trajektorie ruchu punktów pomiarowych zlokalizowanych na kasku i tułowiu podczas testów zderzeniowych: a) dla ochotnika I, a) dla ochotnika II,

2.3. Analiza numeryczna kinematyki głowy i kręgosłupa szyjnego

Zastosowane metody wykorzystujące współczesne techniki do rejestracji i analizy ruchu umożliwiają wyznaczyć parametry kinematyczne kręgosłupa szyjnego i głowy przy różnych wymuszeniach. Uzyskane wyniki z tego typu badań mogą być wykorzystane jako wielkości wejściowe do dynamicznych modeli odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka oraz do ich walidacji. Zweryfikowane w ten sposób modele mogą posłużyć do określenia obciążeń struktur wewnętrznych podczas wypadków samochodowych. Przydatne mogą być także do oceny wpływu stabilizatora na sąsiadujące segmenty, trwałości i stateczności połączenia implantu ze stabilizowanym odcinkiem kręgosłupa oraz określenia miejsc przebudowy struktur kostnych. Takie badania również zostały podjęte w ramach prac prowadzonych w Katedrze Mechaniki Stosowanej. Na ich podstawie został sformułowany dynamiczny model kręgosłupa szyjnego, który umożliwia symulację ruchu głowy i kręgosłupa szyjnego oraz analizę zjawisk zachodzących w strukturach wewnętrznych uwzględnionych w procesie modelowania. Przykładową symulację numeryczną modelu kręgosłupa szyjnego i głowy z wykorzystaniem wielkości kinematycznych uzyskanych w testach zderzeniowych na ochotnikach przedstawia rys. 10. Wyznaczone przemieszczenia głowy z prezentowanych badań wprowadzono do modelu jako dane wejściowe. Dzięki temu możliwa była analiza oddziaływań głowy i kręgów na odkształcenia i naprężenia krążków międzykręgowych podczas zderzeń.



Rys. 10. Symulacja ruchu głowy w środowisku LS-DYNA podczas testu zderzeniowego

3. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają lepiej zrozumieć mechanikę kręgosłupa człowieka. Zastosowana metodyka, wykorzystująca współczesne urządzenia diagnostyczne, umożliwia wyznaczenie parametrów kinematycznych głowy i kręgosłupa szyjnego przy różnym typie wymuszeń. Badania z użyciem rentgenografii czynnościowej i systemu APAS ułatwiają zdefiniowanie poprawnego modelu anatomicznego poprzez poznanie ruchomości na poszczególnych poziomach kręgosłupa. Zaproponowaną metodę można zastosować nie tylko do określenia wzorców ruchowych, ale także do dokładniejszej analizy stanów patologicznych, takich jak zwyrodnienie krążka i stawów międzykręgowych albo weryfikacji przeprowadzonej stabilizacji kręgosłupa.

Opracowana metoda do badań testów zderzeniowych na ochotnikach i skonstruowane stanowisko pomiarowe umożliwiają poznanie i przeanalizowanie zachowania się ciała ludzkiego podczas zderzeń przy bezpiecznych prędkościach. Wyniki z obu metod mogą być wykorzystane jako dane wejściowe do dynamicznego modelu kręgosłupa szyjnego i posłużyć do jego walidacji. Poprawnie zweryfikowany model może zostać wykorzystany w przyszłości do analizy dynamiki ruchu głowy i kręgosłupa oraz zjawisk w nim zachodzących.

Niniejsze badania zostały wykonane ze środków finansowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu nr N N502 365035.

LITERATURA

1. Będziński R.: Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane. Wrocław: Ofic. Wyd. Pol. Wrocł., 1997.
2. Mazurkiewicz S.: Wybrane zagadnienia z inżynierii medycznej. Zbiór publikacji pod redakcją S. Mazurkiewicza. Kraków: Pol. Krak., 2003.
3. Radek A., Maciejczak A.: Stabilizacja kręgosłupa. Cz. I: kręgosłup szyjny. Kraków: Uczel. Wyd. AGH, 2006.
4. Wolański W.: Wpływ implantacji na wartości sił w strukturach kręgosłupa szyjnego. W: XLIV Sympozjon „Modelowanie w mechanice". Gliwice 2055. Zesz. Nauk. Kat. Mech. Stos. nr 29, s. 511-516.

EXPERIMENTAL METHODS OF DETERMINING KINEMATICAL QUANTITIES OF HEAD AND CERVICAL SPINE

Summary. This paper introduces experimental methods of determining kinematical quantities of head and cervical spine. First stage of research allowed to assign the dislocation of cervical spine vertebras under in vivo conditions during head movements. A digital radiography was used to record the movement. For processing results and to estimate quantitative parameters of movement an APAS system (Ariel Performance Analysis System) was used. The research allowed to acquire information about the position of the vertebras during different head placements as well as mutual rotations of neighboring segments. Conducted comprehensive functional analysis is a ground base to identification and to define kinematical parameters describing movement patterns of the spine. The second stage of research included experimental studies on volunteers with the use of a device to simulate a crash of a vehicle into a stationary obstacle. To record the kinematical quantities a set of video cameras from BASLER firm was used, which has a high frequency image recording capability, and an equipment to measure acceleration time courses with SigLab analyzers along with a set of accelerometers. The result analysis allowed to determine kinematical parameters of considered points during forced action derived from rapid stopping. Results of the research will be used as a input data and will allow to verify a model used for analyzing the dynamics of head movement and cervical spine defined in a LS-DYNA environment.