
mgr inż. Kamil SZEWERDA
mgr inż. Wojciech WOŁCZYK
dr inż. Jarosław TOKARCZYK
dr inż. Dariusz MICHALAK
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Odtwarzanie relacji człowiek – maszyna – środowisko w wirtualnym środowisku pracy

Streszczenie

W artykule przedstawiono opracowaną w Laboratorium Metod Modelowania i Ergonomii metodę wspomagania projektantów i konstruktorów maszyn, umożliwiającą ocenę ergonomiczną proponowanych rozwiązań już na etapie ich projektowania. Metoda pozwala na ocenę postaci konstrukcyjnej kabin operatorów, z uwagi na ich wygodne i ergonomiczne użytkowanie. Ewentualne zmiany konstrukcyjne wprowadzane są na etapie wirtualnego prototypowania maszyny. W opracowanej metodzie wykorzystywane są szkieletowe makiety projektowanej maszyny, system przechwytywania ruchu człowieka oraz oprogramowanie umożliwiające przeprowadzenie analiz ergonomicznych.

Summary

The method aiding designers of machines, developed in the Laboratory of Modelling Methods and Ergonomics, which enables ergonomic assessment of suggested solutions at the stage of their designing, is presented. The method enables to assess if the design of operators' cabins is comfortable and ergonomic. Eventual changes to design can be made at the stage of virtual prototyping the machine. The mock-ups of the designed machine, motion capture system and software programme, which enable ergonomic analyses, are used in the developed method.

1. Wprowadzenie

Rozwijające się techniki i systemy przechwytywania ruchu MC (ang. *Motion Capture*) coraz powszechniej wykorzystywane są w wielu dziedzinach życia m.in. w analizach biomechanicznych, kinematografii, sporcie czy przemyśle. Istnieje wiele systemów oraz technologii przechwytywania ruchu, wśród których wymienić należy metody optyczne wykorzystujące specjalne znaczniki (markery) oraz bezmarkerowe, metody inercyjne bazujące na czujnikach bezwładnościowych, metody wykorzystujące ultradźwięki oraz metody mechaniczne. Dane otrzymane w wyniku przechwytywania ruchu wykorzystane zostają m.in. do urealnienia ruchu postaci w filmach szkoleniowych oraz rekonstrukcjach wypadków oraz w celu przeprowadzenia analiz ergonomicznych i biomechanicznych. W Laboratorium Metod Modelowania i Ergonomii Instytutu Techniki Górniczej KOMAG, w celu rejestracji i przechwycenia ruchu człowieka wykorzystano bezmarkerową metodę przechwytywania ruchu opartą o czujniki Microsoft KINECT XBOX 360. Metodę tę wykorzystano do analiz ergonomicznych kabiny operatora lokomotywy kopalnianej Lda-12K-EMA. Ograniczenia przestrzenne wynikające z konstrukcji lokomotywy oraz jej wyposażenia odwzorowano na podstawie dokumentacji technicznej, budując szkieletową makietę kabiny operatora lokomotywy. Wykorzystanie szkieletowej makiety umożliwiło

przeprowadzenie analiz ergonomicznych kabiny operatora podczas czynności wsiadania i wysiadania. Opracowany tok postępowania można wykorzystać również w innych gałęziach przemysłu w celu analizy oraz kształtowania bezpiecznych i ergonomicznych warunków pracy. Jednym z przykładów zastosowania może być przeprowadzenie badania różnych konfiguracji dotyczących konfiguracji pulpitu sterowniczego bądź wysokości siedziska operatora, odbywającego się jeszcze w fazie projektowania nowych środków technicznych [1, 5].

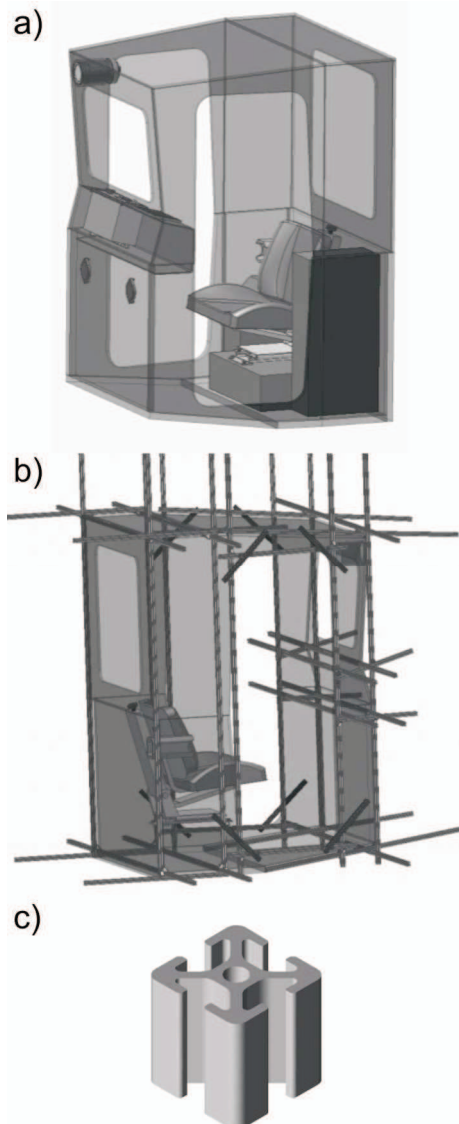
2. Stanowisko badawcze

W ramach pracy badawczej przeprowadzono analizę procesu wsiadania i wysiadania z kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA. W celu przeprowadzenia rejestracji skonfigurowano stanowisko badawcze, na którym przeprowadzane były kolejne próby. Stanowisko to składało się ze szkieletowej makiety kabiny operatora, analizowanej lokomotywy oraz systemu do przechwytywania ruchu w czasie wsiadania i wysiadania z kabiny.

2.1. Makieta kabiny operatora

W oparciu o model geometryczny kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA (rys. 1 a) opracowanym przez konstruktorów w środowisku CAD zbudowano

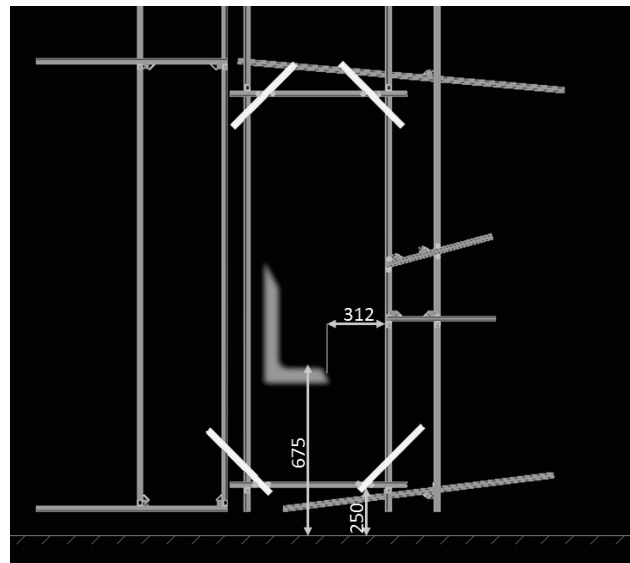
model makiety kabiny (rys. 1. b) poprzez obudowanie jej profilami o przekroju 20x20 mm (rys. 1. c).



Rys.1. Budowa modelu makiety kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA; a) Model geometryczny kabiny operatora, b) Model makiety zbudowanej z profili aluminiowych naniesiony na model geometryczny, c) Model CAD profilu wykorzystanego do budowy stanowiska badawczego [5]

W modelu geometrycznym widoczne jest usytuowanie fotela operatora, pulpit sterowniczy oraz osprzęt kabiny operatora. Struktura szkieletowa zbudowana z profili przedstawia w skali 1:1 gabaryty oraz cechy geometryczne kabiny operatora. Fotel operatora na stanowisku badawczym zastąpiono krzesłem biurowym, które zostało odpowiednio umiejscowione w kabynie. Na podstawie modeli geometrycznych lokomotywy Lda-12K-EMA wyznaczono odległości krawędzi siedziska od główki szyny oraz od pulpitu sterowniczego. Ponadto wyznaczono również wysokość na jakiej znajduje się dolna krawędź otworu przez który operator wsiada do kabiny. Wysokość tę określono również względem główki szyny po której porusza się lokomotywa. Usytuowanie siedziska

w konstrukcji szkieletowej wraz z wielkością odpowiednich wymiarów przedstawiono na rysunku 2 [1, 2, 5].

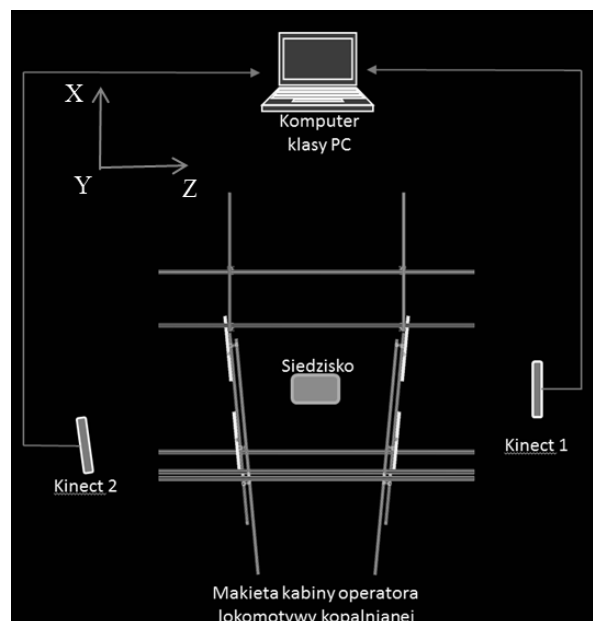


Rys.2. Konstrukcja szkieletowa kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA wraz z pozycją siedziska operatora [5]

2.2. System przechwytywania ruchu

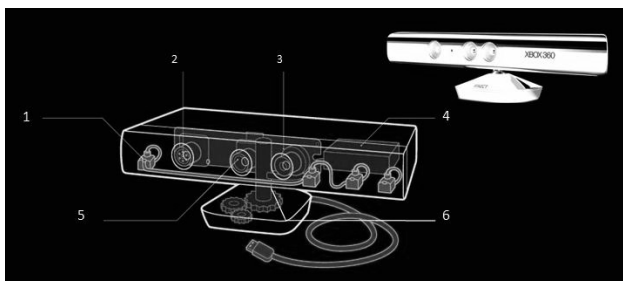
Na stanowisku badawczym zastosowano system służący do rejestracji i przechwytywania ruchu człowieka składającego się z: komputera klasy PC z odpowiednim oprogramowaniem oraz dwóch czujników MS Kinect XBOX 360 zamontowanych na statywach.

Na stanowisku badawczym czujniki MS Kinect rozmieszczono w taki sposób, aby jeden z czujników mógł rejestrować wykonywany ruch z prawej, a drugi z lewej strony makiety kabiny lokomotywy. Na rysunku 3 przedstawiono schemat konfiguracji stanowiska badawczego widziany z góry.



Rys.3. Schemat stanowiska badawczego, kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA [5]

Zastosowany na stanowisku czujnik Microsoft Kinect XBOX 360 opracowany został przez firmę Microsoft. Urządzenie posiada dwie kamery (poz.3 i 5 na rys. 4), promiennik podczerwieni (poz.2 na rys. 4), cztery mikrofony kierunkowe (poz.1 na rys. 4) i napęd pozwalający na uchylenie głowicy (poz.6 na rys. 4).



Rys.4. Budowa czujnika ruchu MS KINECT [3]

Pierwsza z kamer to standardowa kamera wizyjna RGB, o rozdzielczości 640x480, wykorzystywana do przetwarzania obrazu wizyjnego oraz nanoszenia kolorów i tekstur na obiekty wirtualne. Druga kamera przetwarza zniekształconą przez obiekt wiązkę promieni podczerwonych, tworząc model przestrzenny pomieszczenia i obiektów znajdujących się w nim. Podsystem ten działa na zasadzie pomiaru odległości za pomocą światła strukturalnego. Promiennik podczerwieni wyświetla przed kamerą chmurę punktów, których położenia rejestrowane są przez kamerę z filtrem podczerwonym. Uzyskana rozdzielczość informacji o głębi z kamery to 300x200 i dalej, jest ona programowo interpolowana do rozdzielczości kamery wizyjnej (640x480). Zakres działania czujnika odległości to 0,4 – 6,5 m. Informacja o odległości we wszystkich punktach daje możliwość programowego odczytania np. sylwetki człowieka i wykrycia jego gestykulacji [3, 4, 5]. Czujniki MS Kinect połączono z komputerem klasy PC za pomocą interfejsu USB.

3. Przebieg badań

Pierwszym krokiem rozpoczynającym proces rejestracji ruchu wsiadania i wysiadania z makiety kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA jest prawidłowe skonfigurowanie stanowiska badawczego. Konfiguracja stanowiska przebiegała dwuetapowo. W pierwszym etapie czujniki MS Kinect rozmieszczono w sposób umożliwiający rejestrację całej sylwetki osoby wsiadającej do makiety. Etap drugi przygotowania stanowiska do przeprowadzenia prób polegał na usunięciu makiety kabiny z obszaru rejestrowania, a następnie przeprowadzenia kalibracji ustawionych czujników MS Kinect. Po skalibrowaniu czujników, ponownie w rejestrowanej scenie umieszczono makiety kabiny operatora. Podczas ponownego umieszczania makiety w rejestrowanej scenie bardzo istotnym było zwrócenie uwagi na to, aby nie zmieniło się ustawienie skalibrowanych czujników.

Dwuetapowe przygotowanie stanowiska badawczego podyktowane było ograniczeniami zastosowanej metody przechwytywania ruchu. Ograniczenia te polegały na braku możliwości przeprowadzenia kalibracji ustawienia czujników, gdy używana do kalibracji płyta była nawet w nieznacznym stopniu przysunięta elementami makiety kabiny operatora [4, 5].

Po skonfigurowaniu stanowiska badawczego przystąpiono do rejestracji czynności wsiadania i wysiadania z makiety kabiny operatora. Próby stanowiskowe przeprowadzono rejestrując ruch trzech osób o różnych cechach antropometrycznych. Rejestrowane osoby reprezentowały populację o wielkości 10, 60 i 70 centyli. Podczas rejestracji ruchu, każda osoba posiadała założony kask. Zdefiniowano następujący podział sekwencji czynności:

- wejście do makiety kabiny operatora lokomotywy Lda-12K-EMA,
- zajęcie pozycji siedzącej na odpowiednio umiejscowionym siedzisku,
- wychylenie się w celu obserwacji płaszczyzny spągu przed przednią częścią kabiny,
- powtórne przyjęcie pozycji siedzącej na siedzisku,
- wyjście z kabiny operatora.

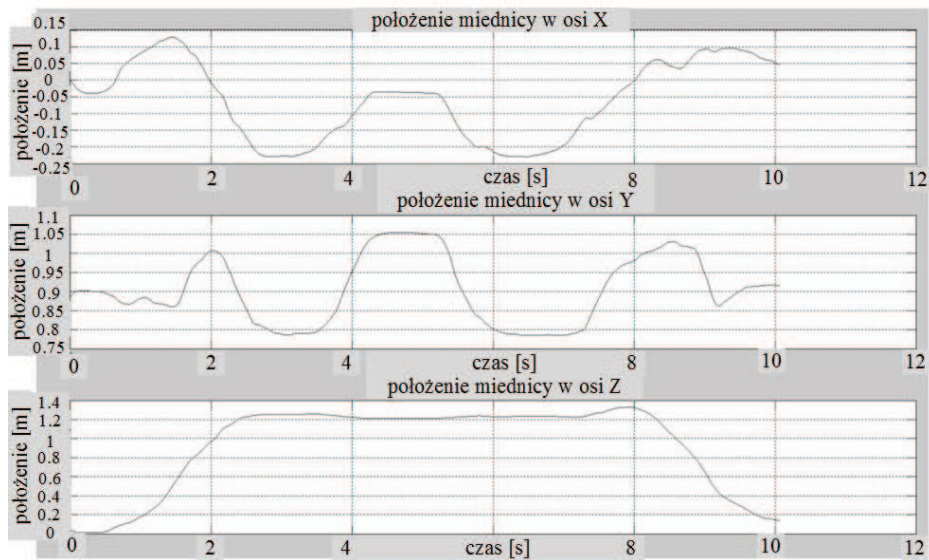
Kolejnym krokiem próby było przetworzenie zarejestrowanych ruchów oraz przeprowadzenie analizy ergonomicznej. Zarejestrowane sekwencje ruchów poddano dyskretyzacji. Zabieg ten polegał na synchronizacji aktora i wirtualnego szkieletu, w odpowiednim oprogramowaniu, co pozwoliło na automatyczne ustawianie szkieletu względem aktora w kolejnych klatkach zarejestrowanego ruchu. W przypadku wystąpienia błędów podczas dyskretyzacji niezbędna była ręczna korekta położenia poszczególnych segmentów szkieletu. Po zakończeniu przechwytywania poprawiano jakość uzyskanego ruchu, poprzez eliminację drżenia poszczególnych kończyn lub wyostrzenia/wygładzania trajektorii ruchu.

Przygotowane w ten sposób dane zapisano w plikach wejściowych. Pliki te stanowią bazę wykorzystaną w kolejnych środowiskach programowych. Na ich podstawie wykonywane są rekonstrukcje ruchu w filmach szkoleniowych oraz przeprowadzane są analizy ergonomiczne i biomechaniczne [5].

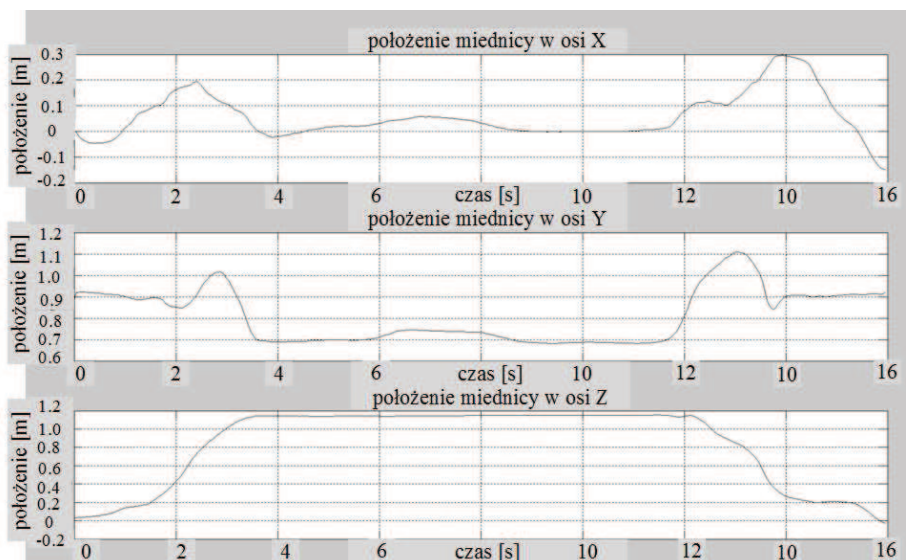
4. Wyniki analiz

Przeprowadzone analizy pozwoliły na: wyznaczenie współczynników dyskomfortu statycznego, wykresów przemieszczeń, prędkości oraz przyspieszeń w poszczególnych osiach układu współrzędnych w odniesieniu do wybranych segmentów ciała. Przyjęto następujący układ jednostek:

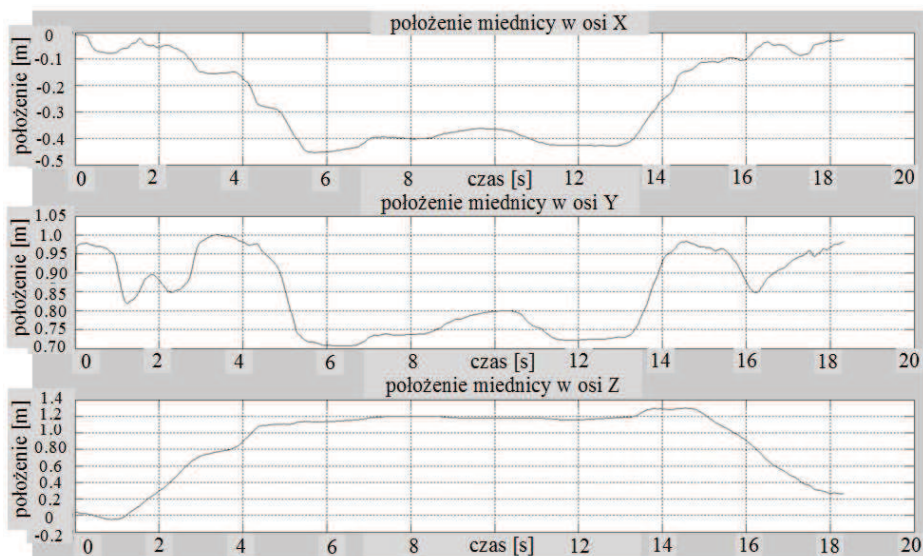
- położenia – [m],
- prędkości – [m/s],
- przyspieszenia – [m/s²].



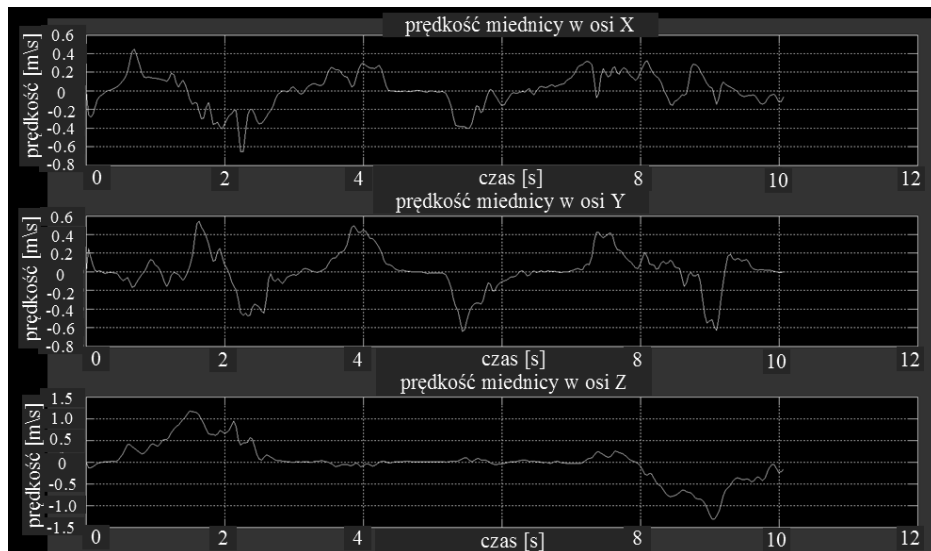
Rys.5. Położenie miednicy w osiach X, Y, Z dla 10 – centylowej osoby [5]



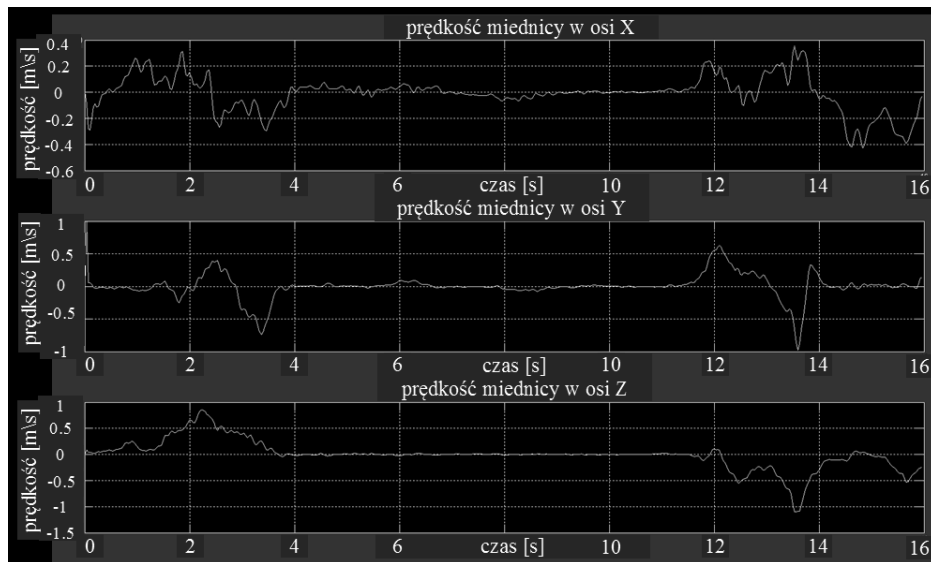
Rys.6. Położenie miednicy w osi X, Y, Z dla 60 – centylowej osoby [5]



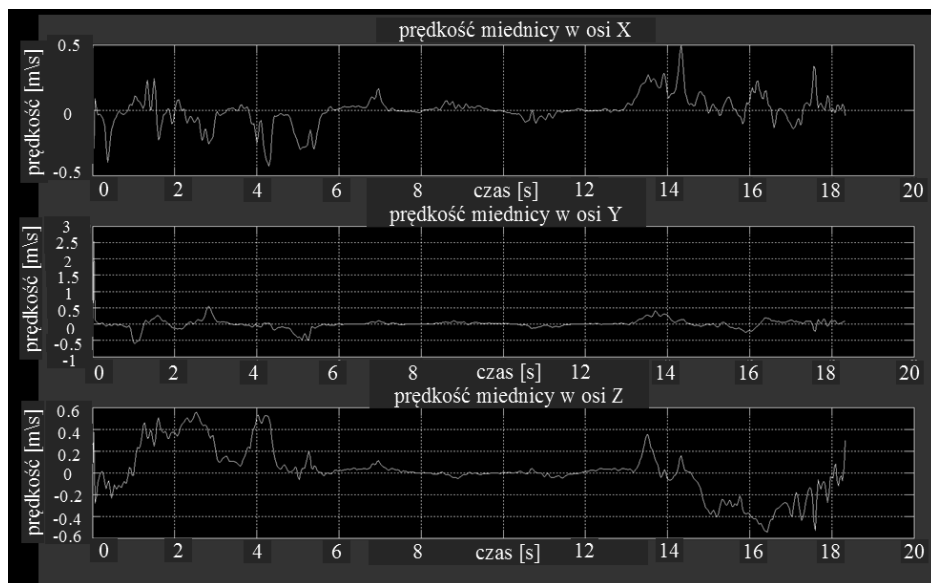
Rys.7. Położenie miednicy w osiach X, Y, Z dla 70 – centylowej osoby [5]



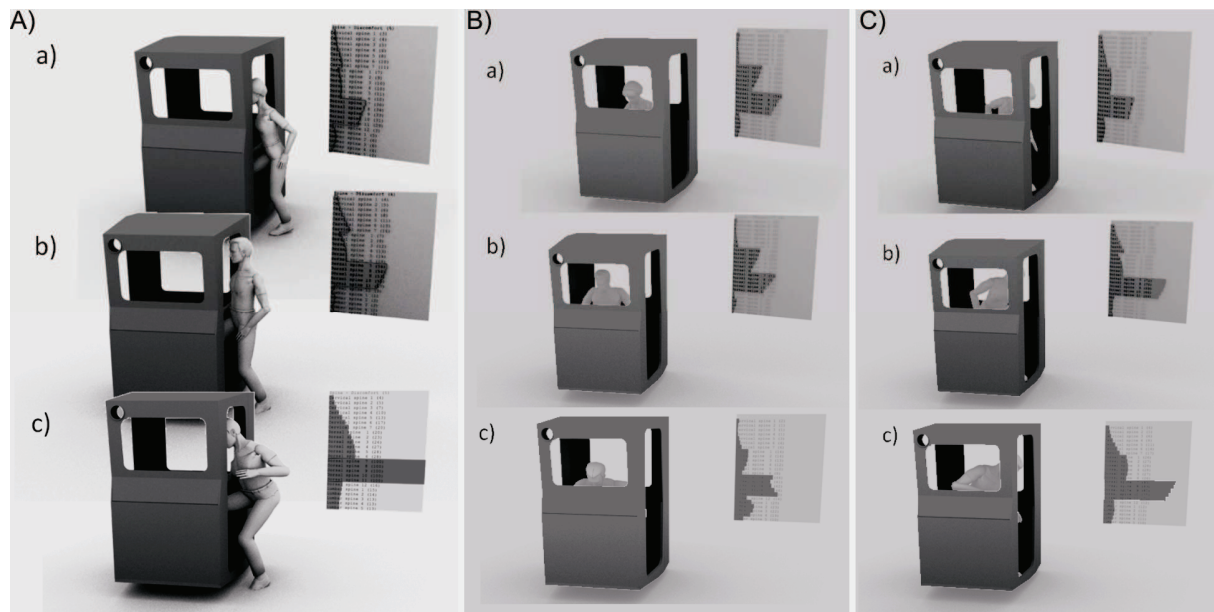
Rys.8. Przebieg prędkości miednicy w osiach X, Y, Z dla 10 – centylowej osoby [5]



Rys.9. Przebieg prędkości przemieszczania się miednicy w osi X, Y, Z dla 60 – centylowej osoby [5]



Rys.10. Przebieg prędkości miednicy w osiach X, Y, Z dla 70 – centylowej osoby [5]



Rys.11. Zestawienie współczynników dyskomfortu statycznego: A) w początkowej fazie wsiadania do kabiny, B) podczas wychylenia operatora w kierunku jazdy, C) w fazie wysiadania z kabiny; dla: a) dla osoby 10 – centylowej, b) dla osoby 60 – centylowej, c) dla osoby 70 – centylowej [5]

Wartość współczynnika dyskomfortu statycznego wyznacza się na podstawie wartości momentów i oporów w stawach oraz stopnia wyczerpania ruchomości w stawach przy uwzględnieniu odpowiednich wag wyznaczonych doświadczalnie. Wartości współczynników dyskomfortu statycznego obliczane są przy użyciu zintegrowanego z programem 3dMax programem ANTHROPOS ErgoMAX [6].

Wykresy przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń wyznaczono w odniesieniu do następujących segmentów ciała: głowa, miednica, lewe i prawe ramię, lewe i prawe biodro, prawe i lewe kolano, lewa i prawa kostka. Jako przykładowy wynik na rysunkach 5 - 7 przedstawiono wykres położenia miednicy podczas rejestrowanego ruchu w trzech osiach kartezjańskiego układu współrzędnych dla osoby 10, 60 i 70 centylowej. Orientację układu względem stanowiska badawczego podano na rysunku 3.

Na rysunkach 8 - 10 przedstawiono wykres prędkości miednicy podczas rejestrowanego ruchu w trzech osiach kartezjańskiego układu współrzędnych dla osoby 10, 60 i 70 centylowej.

Na rysunku 11 przedstawiono zestawienie współczynników dyskomfortu statycznego w poszczególnych fazach rejestrowanego ruchu, takich jak: faza wsiadania do kabiny operatora (rys. 11 A), podczas wychylenia operatora w kierunku jazdy (rys. 11 B) oraz w fazie wysiadania z kabiny (rys. 11 C). Wyniki te przedstawiono dla osób o 10, 60 i 70 centylowej wielkości, co pozwala zaobserwować wpływ cech antropometrycznych operatora na obciążenie jego układu mięśniowo-szkieletowego.

5. Podsumowanie

Opracowana w ITG KOMAG metoda pozwala na przechwycenie i analizę ruchów rejestrowanych osób. Pozwala to na wyznaczenie współczynników dyskomfortu statycznego oraz na obliczenie prędkości i przyspieszeń poszczególnych segmentów ciała. Poprzez analizę otrzymanych wyników możliwe jest porównanie sposobu wsiadania i wysiadania z kabiny operatorów o różnych cechach antropometrycznych. W przeprowadzonych badaniach stanowiskowych zarejestrowano sposób wsiadania i wysiadania dla trzech osób (10, 60 i 70 centylowe osoby). Analiza otrzymanych wyników pozwoliła zaobserwować różnice w sposobie wykonywania rejestrowanej czynności oraz różnice w wartościach współczynników dyskomfortu statycznego. U osoby 10 – centylowej komfort wsiadania i wysiadania był znacznie większy niż w przypadku pozostałych osób. Natomiast wychylenie się do przodu kabiny w celu sprawdzenia spągu tuż przed lokomotywą wymaga znacznie większych przemieszczeń od osoby 10 – centylowej. Największe obciążenia występują podczas wsiadania do kabiny operatora o wielkości 70 centyli, jest to związane z koniecznością wykonania skłonu tułowia przed wejściem do kabiny.

Na podstawie przeprowadzonych rejestracji trzech osób o różnych cechach antropometrycznych widoczne są różne sposoby wsiadania i wysiadania z kabiny.

Dodatkowo analiza różnych konfiguracji stanowiska pracy (np. różna wysokość siedziska) lub różnych sposobów wykonywania tej samej czynności (np.

wsiadanie do kabiny z peronu lub bezpośrednio ze spągu) pod względem ergonomii i biomechaniki posłużyć może do porównania i optymalizacji postaci konstrukcyjnej kabiny operatora już na etapie projektowania.

Ograniczeniami metody są wymagania dotyczące sceny, na której odbywa się rejestracja oraz sposób kalibracji ustawienia czujników. Warunkiem koniecznym do przeprowadzenia prawidłowej kalibracji jest zapewnienie widoczności jednocześnie przez oba czujniki MS KINECT płaskiej płyty o określonych wymiarach. W związku z powyższym konieczne jest usunięcie makiety kabiny lokomotywy ze sceny na czas trwania kalibracji.

Kolejnym ograniczeniem metody jest fakt, że sylwetka aktora, którego ruchy są rejestrowane, musi być widoczna (w całości) dla czujników MS Kinect. Jeżeli dowolna część ciała nie zmieści się w rejestrowanym kadrze lub zostanie przysłonięta elementami scenografii (na przykład stopy zostaną zasłonięte przeszkodą, którą należy przekroczyć) uzyskanie poprawnych wyników zarejestrowanego ruchu może okazać się bardzo utrudnione lub wręcz niemożliwe [5].

Literatura

1. Causse J., Wang X., Denninger L.: *Paper ID 2231, Effects of roof height on car ingress/egress movement*. The First International Symposium on Digital Human Modeling, Lyon 14th to 16th June 2011.
2. Chateauroux E., Monnier M., Wang X., Roybin C.: *Paper ID 2252, Strategy Analysis of Truck Cabin Egress Motion*. The First International Symposium on Digital Human Modeling, Lyon 14th to 16th June 2011.
3. <http://msdn.microsoft.com>
4. http://wiki.ipisoft.com/User_Guide_for_Dual_Depth_Sensor_Configuration
5. Szewerda K., Tokarczyk J., Wołczyk W., Michałak D.: *Zastosowanie metod symulacyjnych w analizie ryzyka, z uwzględnieniem relacji człowiek – maszyna - środowisko*. ITG KOMAG Gliwice 2012 (materiały nie publikowane)
6. Winkler T.: *Komputerowe wspomaganie projektowanie systemów antropotechnicznych*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2005.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2013 r.