

Wiesław MASŁOWSKI¹

Tadeusz OPARA²

Michał BUREK³

STANOWISKO DO WYZNACZANIA POŁOŻENIA ŚRODKA MASY CIAŁA CZŁOWIEKA

W artykule opisano stanowisko do wyznaczenia położenia środka masy ciała człowieka. Konstrukcję stanowiska oparto na dźwigni jednostronnej. Metodę tę jako pierwszy zastosował i opisał Emil du Bois-Reymond. Stanowisko jest elementem wyposażenia laboratorium posturografii Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie, w której są prowadzone badania zdolności do utrzymania równowagi statycznej kandydatów na pilotów wojskowych. Informację ilościową określającą funkcjonowanie układu utrzymania równowagi można uzyskać przez badania posturograficzne. Obejmują one wyznaczenie położenia środka masy ciała badanej osoby, co jest niezbędne do oceny podstawowych parametrów opisujących równowagę człowieka w postawie stojącej. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie parametrów rozkładu statystycznego względnej wysokości środka masy ciała dla licznej grupy młodych mężczyzn i kilku kobiet. Grupa ta ma charakter specyficzny, gdyż są to osoby w podobnym wieku, których potencjalna przydatność do zawodu pilota została już wcześniej potwierdzona przez szczegółowe badanie stanu zdrowia, sprawności fizycznej i psychotechnicznej.

Słowa kluczowe: środek masy ciała człowieka, kalibracja liniowa, system antropokinetyczny, posturografia

1. Wprowadzenie

Środek ciężkości ciała jednorodnego (o stałej gęstości) pokrywa się z jego środkiem geometrycznym. W przypadku brył o regularnych kształtach może być on wyznaczony metodami analitycznymi. W przypadku obiektu niejednorodnego, zwłaszcza o skomplikowanym i niesymetrycznym kształcie, teoretyczne wyznaczenie punktu równoważenia się sił i momentów sił jest znacznie trudniejsze. Z tego powodu są stosowane metody empiryczne. Dodatkową komplikacją jest konieczność uwzględnienia możliwości zmiany jego kształtu, co wymaga jednoznacznego określenia warunków pomiaru.

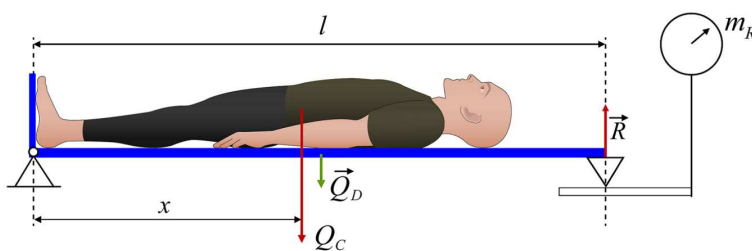
¹ Wiesław Masłowski, WSOSP Dęblin, e-mail: w.maslowski@wsosp.pl

² Autor do korespondencji/corresponding author: Tadeusz Opara, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, 26-600 Radom, ul. Krasickiego 54, e-mail: opara@uthrad.pl

³ Michał Burek, WSOSP Dęblin, e-mail: m.burek@wsosp.pl

2. Wyznaczanie środka masy ciała człowieka metodą dźwigni jednostronnej

Ciało człowieka ma budowę niejednorodną, nieregularny kształt i niesymetryczny rozkład masy. Kształt sylwetki zmienia się w trakcie aktywności życiowej (ruchy głowy, tułowia, kończyn dolnych i górnych). Do wyznaczenia środka masy ciała człowieka w określonej pozycji można wykorzystać metodę dźwigni dwustronnej lub jednostronnej. Środek masy jest zwykle definiowany dla pozycji leżącej, a jego pełny opis wymaga określenia trzech współrzędnych. W zastosowaniach praktycznych najczęściej korzysta się z odległości x do płaszczyzny oparcia stóp (rys. 1.), którą można wyznaczyć metodą dźwigni jednostronnej. Metodę tę jako pierwszy zastosował i opisał Emil du Bois-Reymond [1-4].



Rys. 1. Człowiek leżący na powierzchni dźwigni jednostronnej z ogranicznikiem

Fig. 1. A man lying on the surface of a one-sided lever with a stop

Rysunek 1. przedstawia człowieka o masie m_C , leżącego na płaskiej, sztywnej płycie o masie m_D , której powierzchnia jest prostopadła do kierunku siły ciężkości \vec{Q} . Całkowity moment siły od masy rozłożonej wzdłuż długości l można przedstawić jako sumę momentów ($\vec{M}_D + \vec{M}_C$) od sił skupionych w środku ciężkości dźwigni i leżącego człowieka. Jest on równoważony momentem \vec{M}_R od siły reakcji \vec{R} podpory działającej na jej swobodny koniec oraz momentem \vec{M}_O od pionowego ogranicznika stóp badanego, znajdującego się na jej drugim krańcu.

Z warunku równowagi obciążonej dźwigni:

$$\vec{M}_D + \vec{M}_C + \vec{M}_O + \vec{M}_R = 0 \quad (1)$$

$$l_D \cdot m_D \cdot g + x \cdot m_C \cdot g - \frac{1}{2} d \cdot m_O \cdot g - l \cdot R = 0 \quad (2)$$

można wyznaczyć x :

$$x = \frac{R \cdot l + \frac{1}{2} d \cdot m_O \cdot g - l_D \cdot m_D \cdot g}{m_C \cdot g} \quad (3)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie, l_D – odległość środka ciężkości dźwigni od płaszczyzny ogranicznika pionowego, m_O – masa płyty ogranicznika pionowego, d – grubość płyty ogranicznika pionowego.

Uwzględniając, że ciężar człowieka Q_C i siłę reakcji R wyznacza się, korzystając z wag tensometrycznych, zależność (3) można przedstawić w postaci:

$$x = \frac{2(l \cdot m_R - l_D \cdot m_D) + m_O \cdot d}{2m_C} \quad (4)$$

gdzie m_R – wskazanie wagi obciążonej wolnym końcem dźwigni.

Do realizacji metody du Bois-Reymonda skonstruowano stanowisko pomiarowe składające się z dźwigni jednostronnej, której prawy koniec opiera się na płaszczyźnie pomiarowej wagi typu WPY/150/C2/K.

Przeprowadzono pomiary kontrolne, korzystając z pięciu mas wzorcowych w kształcie dysków o średnicy 31,5 cm, które ustawiano kolejno (w konfiguracji kolumnowej) w pięciu odległościach x_w od pionowego ogranicznika stóp (tab. 1.).

Tabela 1. Wyniki kalibracji dźwigni pięcioma masami wzorcowymi

Table 1. Calibration results of the lever with five reference masses

Lp.	Masa m_w wzorca [kg]	Masa całkowita [kg]	Odległość geometrycznego środka masy wzorca x_w od ogranicznika dźwigni [cm]				
			16,5	50,0	100,0	150,0	200,0
			x [cm]				
1	9,98	9,98	16,5	49,6	100,3	149,9	200,6
2	10,04	20,02	16,5	50,0	100,0	150,0	200,0
3	9,96	29,98	16,5	49,9	100,2	150,1	200,3
4	9,98	39,96	16,5	50,1	100,2	150,0	200,4
5	9,96	49,92	16,5	50,2	100,0	150,1	200,5

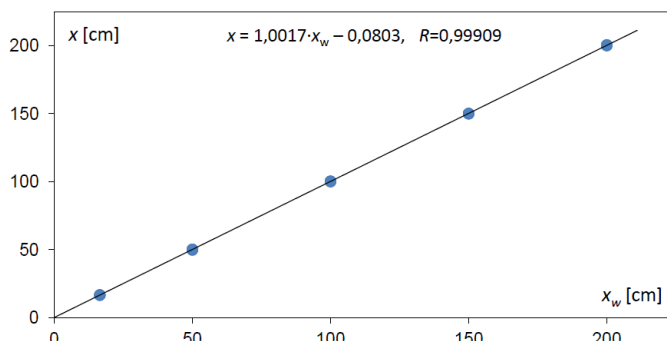
Na rysunku 2. przedstawiono korelację między położeniem mas wzorcowych x_{wi} i odpowiadającymi im wartościami x_i , obliczonymi z relacji (4). Zależność $x_i = f(x_{wi})$ ma charakter liniowy o wysokim współczynniku korelacji $R = 0,9991$.

Średnia wartość modułu różnicy $|x_i - x_{wi}|$ odniesiona do średniej z odległości wzorcowych x_{wi} :

$$\frac{\frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} |x_i - x_{wi}|}{\frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} x_{wi}} = \frac{0,14}{103,4} = 0,00135 \quad (5)$$

ma wartość 0,00135 (0,135%), która pozwala na ocenę niepewności pomiaru położenia środka ciężkości x_i .

Uwzględniając niepewności pomiarów wartości m_R (0,05 kg), mas wzorcowych m_w (0,02 kg) oraz wymiarów liniowych l i l_D (2 mm), całkowitą niepewność pomiaru położenia środka ciężkości oszacowano na 1%.



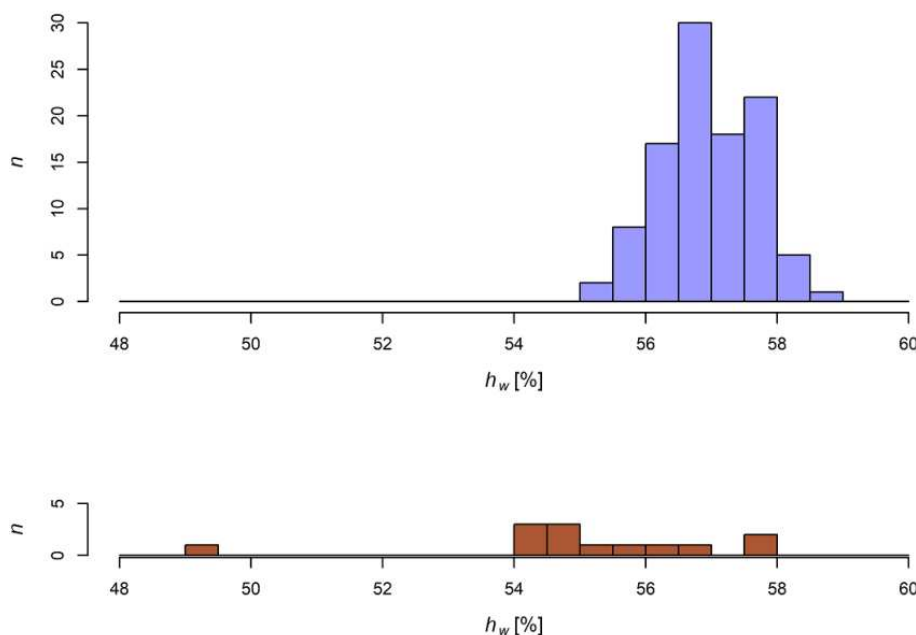
Rys. 2. Zależność $x_i = f(x_{wi})$ pomiędzy obliczonymi x_i i wzorcowymi x_{wi} wartościami środka ciężkości pięciu mas wzorcowych

Fig. 2. Dependence $x_i = f(x_{wi})$ between the calculated x_i and the standard x_{wi} values of the centre of gravity of the five standard masses

3. Położenie środka ciężkości kandydatów na pilotów samolotów wojskowych

Pomiar położenia środka ciężkości kandydatów na pilotów wojskowych (w postawie pionowej) jest wstępnym etapem badania ich zdolności do utrzymania równowagi posturalnej [5-10], która ma duże znaczenie w szkoleniu lotniczym. Przebadano grupę 116 studentów Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie (103 mężczyzn i 13 kobiet). Uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie rozkładów statystycznych względnej wysokości środka masy ciała $h_w = h/x$ dla mężczyzn i kobiet (rys. 3.). Wszystkie osoby są w podobnym wieku, a ich potencjalna przydatność do zawodu pilota została już wcześniej potwierdzona przez szczegółowe badanie stanu zdrowia, sprawności fizycznej i psychotechnicznej.

Parametry rozkładu $n = f(h_w)$ względnej wysokości położenia środka masy ciała mężczyzn są następujące: rozstęp $r = 3,5$ ($h_{wmax} - h_{wmin}$), wartość średnia $h_{wsr} = 57,01$, mediana $h_{wmed} = 56,99$. Dla mniej licznej grupy kobiet rozstęp wyników jest ponaddwukrotnie większy, gdyż $r = 8,4$, a wartości średnie nieco mniejsze: $h_{wsr} = 55,13$ i $h_{wmed} = 54,92$. Porównanie rozkładów $n = f(h_w)$ dla mężczyzn i kobiet jest utrudnione przez fakt, że liczebność męskiej grupy jest ośmiokrotnie większa. Mniejsze wartości względnej wysokości położenia środka masy h_w kobiet są oczywistą tendencją, wynikającą z odmiennego kształtu sylwetki.



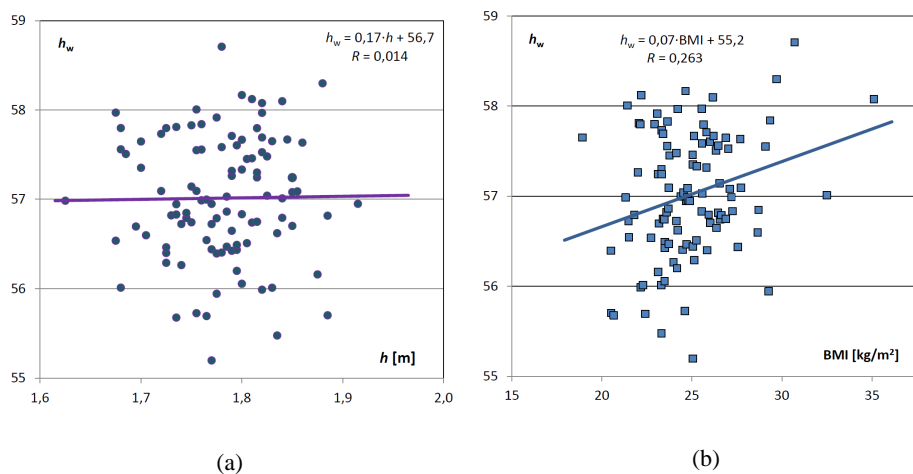
Rys. 3. Histogramy ilustrujące rozkład statystyczny względnej wysokości $h_w = h/x$ grupy 103 mężczyzn (*górny wykres*) i 13 kobiet (*dolny wykres*)

Fig. 3. Histograms illustrating the statistical distribution of relative height $h_w = h/x$ of the group of 103 men (*upper graph*) and 13 women (*bottom graph*)

Na rysunkach 4a i 4b są pokazane zależności względnej wysokości h_w od wysokości h i wskaźnika BMI (*Body Mass Index*). Zbiór punktów (h_i, h_{wi}) z rys. 4a nie wykazuje żadnej korelacji pomiędzy wzrostem h_i i względnym położeniem środka masy h_{wi} badanych osób, co jest potwierdzone przez bardzo małą wartość współczynnika regresji liniowej ($R = 0,014$). Dane (BMI_i, h_{wi}) przedstawione na rys. 4b wskazują na to, że ze wzrostem wskaźnika BMI badanych osób zwiększa się także wartość wysokości względnej h_w , ale trend ten nie jest ewidentny ($R = 0,263$).

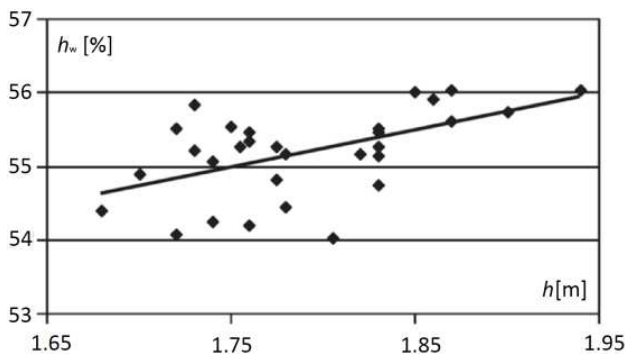
Brak zależności pomiędzy wzrostem h i względnym położeniem środka ciężkości h_w ($R = 0,014$) jest wynikiem interesującym i odbiegającym od innych pomiarów tego typu, gdyż w przypadku grup składających się z 20-30 osób często pojawia się trend rosnący, a niekiedy także malejący. Na rysunku 5. pokazano zależność $h_w = f(h)$ dla trzydziestu studentów Akademii Wychowania Fizycznego i Sportu w Gdańsku [11]. Studenci WSOSP w Dęblinie i AWFIS w Gdańsku to osoby o wysokiej sprawności fizycznej i zdrowe. Wyniki korelacji pomiędzy względną wysokością środka ciężkości h_w i wskaźnikiem BMI powinny być więc podobne, a jednak nie są. Jest to spowodowane dysproporcją w liczbie osób, które

brały udział w badaniach: WSOSP – 103, AWFiS – 30. Wynik uzyskany dla kandydatów na pilotów wojskowych (grupa ponadtrzykrotnie liczniejsza) należy uznać za statystycznie bardziej wiarygodny.



Rys. 4. Zależność względnej wysokości środka masy ciała dla grupy 103 mężczyzn h_w [%] od ich wzrostu (a) i wskaźnika BMI (b)

Fig. 4. Relation of the relative height of the body mass center h_w [%] for the group of 103 men from their height (a) and BMI (b)



Rys. 5. Zależność względnej wysokości środka masy ciała dla grupy 30 mężczyzn h_w [%] od ich wzrostu [11]

Fig. 5. Relation of the relative height of the body mass center h_w [%] for the group of 30 men from their height [11]

4. Podsumowanie

Przedstawiono stanowisko pomiarowe do wyznaczania położenia środka masy człowieka w postawie stojącej h metodą dźwigni du Bois-Reymonda. Wysokość h jest wykorzystana w badaniach posturograficznych [9, 10], które pozwalają ocenić w sposób ilościowy zdolność osoby badanej do utrzymania równowagi statycznej.

Literatura

- [1] Szczeppek E., Czerwosz L., Dąbrowski P., Dudziński K., Jurkiewicz J., Czerwiński Z.: Badanie posturograficzne i komputerowa analiza chodu w systemie Computer Dyno Graphy jako nieinwazyjne metody oceny zaawansowania wodogłównia normotensyjnego, *Neurologia Neurochirurgia Polska*, 42 (2008) 139-152.
- [2] Golema M.: Charakterystyka procesu utrzymania równowagi ciała człowieka w obrazie stabilograficznym, Wydawnictwo AWF, Wrocław 2002.
- [3] Grimshaw P., Lees A., Fowler N., Burden A.: *Biomechanika sportu*, PWN, Warszawa 2010.
- [4] Bober T., Zawadzki J.: *Biomechanika układu ruchu człowieka*, Wydawnictwo BK, Wrocław 2001.
- [5] Opara T., Preibish P.: Computerized stabilography as diagnostic tool for selected cases of curvature of the backbone, VI-th Int. Conf. CADSM 2001, Publishing House of Lviv Polytechnic National University 2001, pp. 265-268.
- [6] Opara T., Preibish P., Iwanejko L.: Determination of synthetic parameters characterizing the human balance in static conditions, Proc. Int. Conf. TCSET'2002, Publishing House of Lviv Polytechnic, pp. 315-319.
- [7] Opara T., Preibish P.: Określenie parametrów charakteryzujących statokinetyczną równowagę człowieka, V Szkoła – Konferencja MWK'2001 (materiały: sekcja VI – Inne Zastosowania Metrologii, t. 2, s. 335-342).
- [8] Opara T., Preibish P.: Stabilografia komputerowa jako narzędzie diagnostyczne dla wybranych przypadków schorzeń kręgosłupa, IV Konf. Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu TRANSCOMP 2000, Zakład Poligrafii ITE w Radomiu, s. 673-680.
- [9] Masłowski W., Opara T., Burek M.: Posturographic examination of candidates for military pilots, I Kongres Lotniczy i Kosmonautyczny, Rzeszów 2016, s. 73-75.
- [10] Masłowski W., Opara T., Burek M.: Posturographic tests of candidates for military pilots, *Trans. Institute Aviation*, 2 (2017) 45-56.
- [11] Erdmann W.S., Kowalczyk R.: A personalized method for estimating centre of mass location of the whole body based on differentiation of tissues of a multi-divided trunk, *J. Biomechanics*, 48 (2015) 65-72.

THE MEASURING DEVICE FOR DETERMINING THE LOCATION OF THE CENTER OF HUMAN BODY MASS

Abstract

The article describes the measuring device for determining the location of the center of human body mass, the construction of which is based on the properties of a one-sided lever. This device is a part of the posturograph laboratory of the Air Force Academy in Dęblin, where research is conducted on the ability to maintain static balance of candidates for military pilots. Quantitative information describing the functioning of the balance maintenance system can be obtained through posturographic research. It includes determination of the location of the center of body mass of the examined person. The measuring device was subjected to the linear calibration process. The obtained results allowed to determine the parameters of the statistical distribution of the relative height of the body mass center for a large group of young men and a few women. This group is specific in nature, because they are people of similar age, whose potential fitness for the military pilot profession has already been confirmed by a detailed examination of the state of health, physical and psychotechnical skills.

Keywords: center of mass, linear calibration, posturography

DOI: 10.7862/rm.2018.15

Przesłano do redakcji: 28.04.2018

Przyjęto do druku: 29.05.2018