

dr inż. RAFAŁ HRYNYK

b. pracownik naukowy CIOP-PIB

prof. dr hab. inż. IWONA FRYDRYCH

Instytut Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej, konsultant naukowy CIOP-PIB

dr inż. AGNIESZKA CICHOCKA

Instytut Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej

Kontakt: iwona.frydrych@p.lodz.pl

DOI: 10.5604/01377043.1204748

Zastosowanie techniki skanowania 3D do pomiaru stóp (1)

Metodyka i wyniki pomiarów



Fot. FZ Designy/Bigstockphoto

Przedstawiono 15 parametrów stopy ludzkiej oraz metodykę ich pomiaru za pomocą skanera ręcznego 3D. Pomiar stopy powinien stanowić podstawę do projektowania obuwia ochronnego dopasowanego do określonych typoszeregów użytkowników lub wyrobów przeznaczonych dla indywidualnego klienta. Wykonano pomiary 15 parametrów stopy ludzkiej 55 ochotników w pozycji siedzącej (dla stopy odciążonej) oraz w pozycji stojącej (dla stopy dociążonej) przed i po wysiłku fizycznym, a następnie przeprowadzono ich ocenę.

Słowa kluczowe: parametry stopy, skaner ręczny, odciążona i obciążona stopa

Application of 3D scanning technique for measuring feet (1)

Methodology and measurement results

This paper presents 15 parameters of the human foot and a methodology for measuring them with a 3D handy scanner. This kind of measurement is a basis for designing shoes for a given group of users or products dedicated for an individual client. Fifteen foot parameters were measured for 55 volunteers in the sitting position (for an unloaded foot) and in the standing position (for a loaded foot) before and after effort. The results were then analysed.

Keywords: foot parameters, handy scanner, unloaded and loaded foot

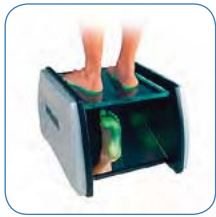
Wstęp

Środki ochrony indywidualnej stosowane na stanowiskach pracy, oprócz spełnienia wymagań zasadniczych dyrektywy 89/686/EWG [1], rozporządzenia Ministra Gospodarki [2] oraz zharmonizowanych norm przedmiotowych, powinny być tworzone tak, aby istniała możliwość ich dopasowania do wymiarów pracownika. Dlatego też bardzo ważnym etapem projektowania obuwia ochronnego jest zaprojektowanie jego „kopyt” zgodnych z rzeczywistymi wymiarami stóp pracowników, będących jego użytkownikami. Technika skanowania 3D pozwala rejestrować wymiary antropometryczne stóp pracowników, a po ustaleniu warunków stopniowania „kopyt” w odniesieniu do danej grupy użytkowników – przygotować ich cyfrowe modele, na podstawie których opracowywane będą fizyczne formy obuwia (czyli wspomniane „kopyta”), [3-7].

Projektowanie obuwia ochronnego na podstawie uśrednionych wartości zarejestrowanych wymiarów antropometrycznych stóp, może skutkować ich niedopasowaniem w stosunku do większej grupy użytkowników, gdyż mogą występować odstępstwa od uśrednionych wymiarów antropometrycznych w badanej populacji pracowników [8]. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem byłoby wydzielenie w badanej grupie użytkowników charakterystycznych typów antropometrycznych i ustalenie odpowiedniego zakresu stopniowania rozmiarów kopyt z wykorzystaniem możliwie jak najszerszego zakresu parametrów. W przypadku osób charakteryzujących się znacznymi odstępstwami w zakresie poszczególnych wymiarów antropometrycznych stóp zalecane jest opracowanie osobnego wzoru „kopyt”. Pozwala to na zredukowanie liczby „kopyt” z odstępstwami od uśrednionych wymiarów antropometrycznych i wytwarzania tzw. spersonalizowanego obuwia ochronnego.

Celem prowadzonych badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania skanera ręcznego 3D do rejestracji wymiarów antropometrycznych stóp. Dodatkowo zamierzano przeprowadzić porównanie klasycznej metody pomiaru parametrów stóp i metody skanowania oraz sprawdzić, czy istnieją różnice w wymiarach stóp przed i po wysiłku (co zostało przedstawione w tabeli 1., a wnioski na ten temat – w podsumowaniu). Celem pośrednim w przyszłości będzie, dzięki możliwości przeprowadzania precyzyjniejszych i mniej czasochłonnych pomiarów, wyeliminowanie obciążeń mięśniowo-szkieletowych spowodowanych nierównomiernym rozłożeniem nacisku na stopę podczas chodu w obuwiu ochronnym.

Zgodnie z celem badań, w pierwszej części publikacji opisano metodykę ich prowadzenia ze szczegółowym opisem sposobu pomiaru 15 parametrów opisujących stopę. Przedstawiono również wyniki badań z udziałem ochotników



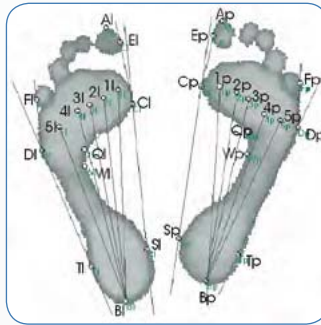
Rys. 1. Podoskop do oceny parametrów stóp

Fig. 1. Podoscope for assessing foot parameters



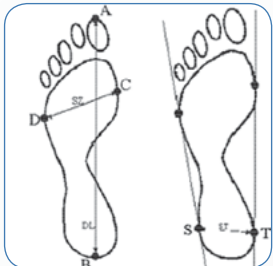
Rys. 2. Podest do skanowania stóp za pomocą skanera ręcznego 3D

Fig. 2. Platform for scanning feet with a 3D handy scanner



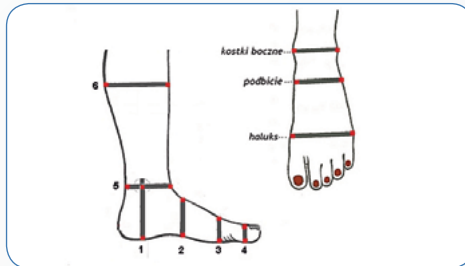
Rys. 3. Przykład plantokonturogramu z zaznaczonymi punktami i prostymi liniami (A,B – wyznaczają oś długą stopy, C,D – szerokość przodostopia, S,T – szerokość pięty, E – punkt styczności z paluchem, F – punkt styczności z palcem, Q – styčna wewnętrzna dla kąta Clarke'a, W – centrum wysklepienia dla wskaźnika Sztritera-Godunowa, 1-5 – głowy kości palców stóp)

Fig. 3. An example of a footprint with marked points and straight lines (A,B determine the long foot axis; C,D - forefoot width, S,T - heel width, E - the contact point with the toe, F - the contact point with the phalange, Q - inner tangent for Clark's angle, W - the centre of foot arches for Sztriter-Godunov indicator, 1-5 - heads of foot phalanges)



Rys. 4. Schemat pomiaru długości i szerokości stopy oraz szerokości pięty

Fig. 4. A diagram of determining foot length, foot width and heel width



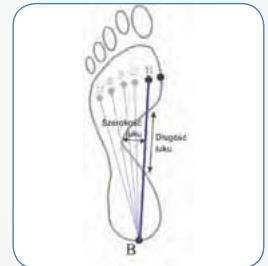
Rys. 5. Schemat pomiaru wysokości palucha, podbicia i kostki zewnętrznej oraz obwodu przodostopia, podbicia, kostki i łydki

Fig. 5. A diagram of determining the height of the toe, instep and outer ankle, and the perimeter of the forefoot, instep, ankle and calf



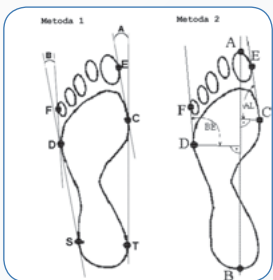
Rys. 6. Schemat pomiaru obwodu przez piętę

Fig. 6. A diagram of determining the perimeter through the heel



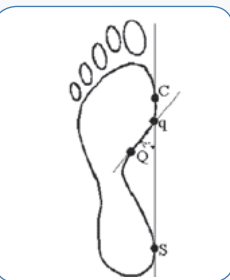
Rys. 7. Schemat pomiaru długości (wysokości) łuku podłużnego

Fig. 7. A diagram of determining the length (height) of the longitudinal arch



Rys. 8. Schemat pomiaru kątów nachylenia palucha α i palca małego β

Fig. 8. A diagram of determining the angle of the toe (α), and the angle of the small phalange (β)



Rys. 9. Schemat wyznaczania kąta Clarke'a (CL)

Fig. 9. A diagram of determining Clark's angle (CL)



Rys. 10. Przykładowe obrazy stóp i sposób wyznaczania linii, uzyskane z wykorzystaniem skanera ręcznego 3D i wspomagającego oprogramowania komputerowego

Fig. 10. Sample foot images obtained with a 3D handy scanner and computer software



Fot. Obuwie stosowane przez ratowników podczas badań

Photo. Shoes worn by rescuers during the measurements

dla stopy odciążonej i dociążonej zarówno przed wysiłkiem, jak i po wysiłku. Praktyczne aspekty dokładności dopasowania obuwia zostaną przedstawione w drugiej części artykułu pn. „Zastosowanie techniki skanowania 3D do pomiaru stóp (2). Ocena dopasowania”.

Parametry oceny wymiarów stóp

Charakterystyka wymiarów stopy metodą klasyczną polega na przygotowaniu jej dokładnej odbitki na papierze (tzw. plantokonturogramu przedstawionego na rys. 3.) i zmierzeniu odpowiednich wymiarów, jak również pozyskaniu informacji o przestrzennym (3D) ukształtowaniu stopy, umożliwiającym ocenę rozłożenia sił jej nacisku. Powszechnie stosowanym w tym celu urządzeniem jest podoskop, którego przykład przedstawiono na rys. 1. Podoskop umożliwi wykonanie odwzorowania stopy na rysunku, czyli sporządzenie tzw. plantokonturogramu, a następnie pomiaru odpowiednich parametrów

za pomocą przymiaru. Na rys. 2. przedstawiono podest do skanowania stóp za pomocą skanera ręcznego 3D.

Parametry charakteryzujące wymiary antropometryczne stóp z wykorzystaniem skanera ręcznego 3D uwzględniają podobny zakres badań, który wykonywany jest za pomocą podoskopu, co opisano szczegółowo dalej.

Pomiary antropometryczne stóp, przeprowadzone przez autorów artykułu obiema metodami (klasyczną i za pomocą skanera 3D), uwzględniały łącznie zestaw 15 parametrów: 7 podstawowych i 8 dodatkowych.

Parametry podstawowe: długość stopy, szerokość stopy (przodostopia), szerokość pięty, obwód przodostopia, wysokość palucha, kąt nachylenia (ustawienia) palucha α , kąt nachylenia (ustawienia) palca małego β .

Parametry dodatkowe: wysokość podbicia, wysokość łuku podłużnego stopy, wysokość kostki zewnętrznej, obwód przez podbicie, obwód przez piętę, obwód przez kostkę, obwód łydki

(podudzia), kąt Clarke'a (sposób wyznaczenia tego kąta przedstawiono na rys. 9.).

Przed badaniem na stronie podeszwy stóp zaznaczano położenie pięciu głów kości śródstopia. Osoba badana miała stopy ustawione pod kątem prostym w stosunku do podudzia, a podudzie pod kątem prostym w stosunku do uda. Stopy były oparte na blacie szklanym (rys. 1. lub 2.), pod którym dokonywano rejestracji podeszwy stóp w odciążeniu (tzn. w pozycji siedzącej). Następnie osoba badana stawała na blacie w pozycji rozluźnionej i rejestrowano stronę podeszwy stóp w obciążeniu, tzn. w pozycji stojącej. Schemat przygotowania plantokonturogramu z zaznaczonymi punktami do oceny wymiarów stóp przedstawia rys. 3.

Wykaz mierzonych parametrów charakteryzujących stopy wraz z opisem pomiaru przedstawiono na odpowiednich rysunkach:

¹ w przypadku metody tradycyjnej wykonuje się to na papierze, a w przypadku skanowania – na obrazie cyfrowym

- długość stopy liczona pomiędzy punktami A i B (rys. 4.)
- szerokość stopy liczona pomiędzy punktami C i D (rys. 4.)
- szerokość pięty liczona pomiędzy punktami S-T (rys. 4.).
- iloraz długości stopy do jej szerokości (wskaźnik Wejsfloga) powinien wynosić 3:1. Z reguły przyjmuje on wartości pomiędzy 2 a 3. Wartości bliższe „2” świadczą o płaskostopiu poprzecznym, natomiast bliższe „3” dowodzą prawidłowego wysklepienia poprzecznego.

Na rys. 5. przedstawiono miejsca wyznaczonych parametrów: wysokość kostki zewnętrznej (pomiar 1), wysokość podbicia i obwód przez podbicie (pomiar 2), obwód przodostopia (pomiar 3), wysokość palucha (pomiar 4), obwód przez kostkę (pomiar 5) oraz obwód łydki/podudzia (pomiar 6). Sposób pomiaru obwodu przez piętę przedstawiono na rys. 6., zaś pomiar wysokości/długości łuku podłużnego stopy – na rys. 7.

Następnym wyznaczanym parametrem jest kąt nachylenia (ustawienia) palucha α .

Kąt ten można określać na różne sposoby, wykorzystując jako podstawę pomiarów prostą CT (metoda 1 – rys. 8.), będącą styczną do przyśrodkowego brzegu stopy lub prostą AB (metoda 2 – rys. 8.), określającą długość stopy od palucha do pięty. W badaniach zastosowano pomiar kąta ustawienia palucha α wykorzystując metodę nr 1, gdzie kąt α wyznaczany jest pomiędzy prostą prostopadłą do AB i przechodzącą przez punkt C oraz prostą CE poprowadzoną z punktu w najszerszym miejscu przodostopia (punkt C) do zewnętrznego brzegu palucha (punkt E).

Kąt nachylenia (ustawienia) palca małego V-go β (rys. 8.) wyznaczany jest podobnie jak kąt α , ale po stronie zewnętrznej brzegu stopy. Podobnie jak w przypadku pomiarów kąta α , tak i tutaj wykorzystano metodę nr 2, gdzie kąt β wyznaczany jest pomiędzy prostą prostopadłą do AB i przechodzącą przez punkt D oraz prostą DF poprowadzoną z punktu w najszerszym miejscu przodostopia (punkt D) do zewnętrznego brzegu palca małego (punkt F).

Wskaźnik kątowy Clarke'a – tzw. kąt Clarke'a – przedstawiono na rys. 9.

Istnieje wiele metod, którymi ocenia się odbitekę przez wykreślenie szeregu linii pomocniczych. Najpopularniejszą i najprostszą z nich jest tzw. metoda Clarke'a, która polega na wykreśleniu prostej C-S. Prosta ta, przecinająca się ze styczną wewnętrzną (Q-q), daje kąt Clarke'a. Jego wartość przedstawia się odpowiednio:

- stopa płaska do 30°
- stopa z obniżonym wysklepieniem od 31° do 41°
- stopa normalna od 42° do 54°
- stopa z podwyższonym wysklepieniem powyżej 55°.

Przykładowe obrazy stóp uzyskane z wykorzystaniem skanera 3D z przodu i z tyłu przedstawiono na rys. 10.

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów antropometrycznych stóp przed wysiłkiem (stopa odciążona – pozycja siedząca i stopa dociążona – pozycja stojąca)

Table 1. Measurement results for anthropometric foot parameters before effort (unloaded foot – sitting position, loaded foot – standing position)

Lp	Parametry stopy	Stopa odciążona		Stopa dociążona	
		Pomiar klasyczny	Pomiar cyfrowy (metoda skanowania)	Pomiar klasyczny	Pomiar cyfrowy
		Wartość średnia \pm SD	Wartość średnia \pm SD	Wartość średnia \pm SD	Wartość średnia \pm SD
1	długość stopy [mm]	271 \pm 12	270,39 \pm 12,64	279 \pm 13	279,18 \pm 12,93
2	szerokość przodostopia [mm]	108 \pm 7	107,41 \pm 6,36	111 \pm 7	111,61 \pm 6,45
3	szerokość pięty [mm]	73 \pm 5	73,62 \pm 5,12	78 \pm 5	77,52 \pm 5,07
4	obwód przodostopia [mm]	249 \pm 13	249,76 \pm 12,75	267 \pm 14	267,7 \pm 14,84
5	wysokość palucha [mm]	24 \pm 3	24,01 \pm 3,51	24 \pm 3	23,5 \pm 3,61
6	kąt ustawienia palucha α [°]	88 \pm 6	87,46 \pm 6,63	84 \pm 6	83,77 \pm 6,74
7	kąt ustawienia palca V-go β [°]	83 \pm 6	82,48 \pm 5,42	81 \pm 6	81,78 \pm 5,39
8	obwód przez kostkę [mm]	261 \pm 12	261,53 \pm 12,58	262 \pm 12	261,73 \pm 12,80
9	wysokość podbicia [mm]	66 \pm 6	65,40 \pm 5,46	66 \pm 6	66,61 \pm ,39
10	wysokość łuku podłużnego [mm]	10 \pm 3	10,05 \pm 3,53	14 \pm 4	14,95 \pm 3,54
11	wysokość kostki zewn. [mm]	55 \pm 5	55,08 \pm 4,87	54 \pm 5	55,58 \pm 4,93
12	obwód przez podbicie [mm]	250 \pm 2	250,63 \pm 12,88	259 \pm 14	259,33 \pm 12,81
13	obwód przez piętę [mm]	343 \pm 16	342,32 \pm 16,60	344 \pm 16	343,42 \pm 16,85
14	obwód łydki [mm]	364 \pm 37	364,58 \pm 36,80	364 \pm 38	365,10 \pm 36,92
15	kąt Clarke'a [°]	47 \pm 11	46,42 \pm 11,58	45 \pm 11	45,36 \pm 11,67

Tabela 2. Wyniki pomiarów parametrów antropometrycznych stóp po wysiłku (stopa odciążona – pozycja siedząca i stopa dociążona – pozycja stojąca)

Table 2. Measurement results for anthropometric foot parameters after effort (unloaded foot – sitting position, loaded foot – standing position)

Parametry stóp	Stopa odciążona		Stopa dociążona	
	Pomiar klasyczny	Pomiar cyfrowy	Pomiar klasyczny	Pomiar cyfrowy
	Wartość średnia \pm SD	Wartość średnia \pm SD	Wartość średnia \pm SD	Wartość średnia \pm SD
Długość stopy [mm]	270 \pm 12	271,68 \pm 12,83	280 \pm 14	280,98 \pm 13,45
Szerokość przodostopia [mm]	109 \pm 7	108,30 \pm 6,87	115 \pm 7	116,42 \pm 7,11
Szerokość pięty [mm]	73 \pm 6	73,74 \pm 5,80	78 \pm 6	78,41 \pm 5,34
Obwód przodostopia [mm]	253 \pm 10	253,43 \pm 9,65	274 \pm 15	274,76
Wysokość palucha [mm]	25 \pm 3	24,97 \pm 3,25	24 \pm 5	23,68 \pm 3,67
Kąt ustawienia palucha α [°]	88 \pm 6	87,94 \pm 6,20	86 \pm 6	87,41 \pm 6,69
Kąt ustawienia palca V-go β [°]	85 \pm 6	84,71 \pm 6,14	82 \pm 6	83,06 \pm 5,33
Obwód przez kostkę [mm]	262 \pm 10	262,73 \pm 10,55	262 \pm 12	261,94 \pm 12,82
Wysokość podbicia [mm]	66 \pm 6	65,82 \pm 5,80	68 \pm 6	68,73 \pm 5,42
Wysokość łuku podłużnego [mm]	8 \pm 4	8,35 \pm 3,69	11 \pm 3	11,58 \pm 3,61
Wysokość kostki zewn. [mm]	55 \pm 5	55,27 \pm 4,96	54 \pm 5	55,62 \pm 4,88
Obwód przez podbicie [mm]	251 \pm 13	250,74 \pm 13,02	264 \pm 14	265,61 \pm 15,92
Obwód przez piętę [mm]	343 \pm 17	343,36 \pm 16,74	349 \pm 16	350,52 \pm 16,95
Obwód łydki [mm]	364 \pm 37	365,04 \pm 37,62	364 \pm 38	365,27 \pm 36,82
Kąt Clarke'a [°]	44 \pm 11	44,5 \pm 10,76	43 \pm 11	42,82 \pm 12,03

Ocena wymiarów antropometrycznych stóp ochotników

Badania polegające na rejestracji obrazów trójwymiarowych stóp przeprowadzono na grupie 55 mężczyzn, będących przedstawicielami trzech grup ratowników, w tym: ratownictwa górniczego (25 ochotników z CSRG S.A.), ratownictwa chemicznego (14 ochotników z PKN Orlen S.A.) oraz straży pożarnej (16 ochotników z Komendy Miejskiej Państwowej Straży Pożarnej w Łodzi). Pomiaru wykonano za pomocą skanera ręcznego 3D, z użyciem szklanego podestu przedstawionego na rys. 2. oraz wspomagającego oprogramowania komputerowego, które umożliwia wykonywanie

skanów, ich automatyczne łączenie w czasie rzeczywistym, edycję i naprawę plików oraz pomiar odpowiednich odległości, opisanego szczegółowo przez Hrynyka i współautorów w artykule opublikowanym w „Bezpieczeństwie Pracy” [9].

W celu zidentyfikowania odchyleń osobniczych w kontekście wymiarów antropometrycznych stóp, przeprowadzono pomiary przed- i po wysiłku polegającym na 20-minutowym marszu po bieżni z ustaloną prędkością 5 km/h w obuwiu przedstawionym na fotografii. Przypuszczano, iż na skutek długotrwałego wysiłku stopy ratownika w obuwiu utrzymującym ciepło stopy ratownika puchną.

W pierwszej kolejności przeprowadzono ocenę parametrów antropometrycznych stóp od-

Tabela 3. Wpływ wysiłku na wymiary stóp (stopa odciążona – pozycja siedząca)
 Table 3. The influence of effort on foot dimensions (unloaded foot – sitting position)

Parametry stóp	Parametry podstawowe			
	Średnie arytmetyczne		Różnice	
	przed wysiłkiem	po wysiłku	bezwzględne	Zmienna t-studenta
Długość stopy [mm]	270,39	271,68	1,29	0,85
Szerokość przodostopia [mm]	107,41	108,3	0,89	0,83
Szerokość pięty [mm]	73,62	73,74	0,12	0,31
Obwód przodostopia [mm]	249,76	253,43	3,67	1,52
Wysokość palucha [mm]	24,01	24,97	0,96	0,95
Kąt ustawienia palucha [°]	87,46	87,94	0,48	0,20
Kąt ustawienia palca V-go [°]	82,48	84,71	2,23	0,89
Obwód kostki [mm]	261,53	262,73	1,2	1,02
Wysokość podbicia [mm]	65,4	65,82	0,42	0,07
Wysokość łuku podłużnego [mm]	10,05	8,35	-1,70	1,36
Wysokość kostki zewn. [mm]	55,08	55,27	0,19	0,67
Obwód przez podbicie [mm]	250,63	250,74	0,11	1,74
Obwód przez piętę [mm]	342,32	343,36	1,04	0,92
Obwód łydki [mm]	364,58	365,04	0,46	0,18
Kąt Clarke'a [°]	46,42	44,52	-1,90	1,65

Tabela 4. Wpływ wysiłku na wymiary stóp (stopa dociążona – pozycja stojąca)
 Table 4. The influence of effort on foot dimensions (loaded foot – standing position)

Parametry stóp	Parametry podstawowe			
	Średnie arytmetyczne		Różnice	
	przed wysiłkiem	po wysiłku	bezwzględne	Zmienna t-studenta
Długość stopy [mm]	279,18	280,98	1,80	0,90
Szerokość przodostopia [mm]	111,61	116,42	4,81	3,95
Szerokość pięty [mm]	77,52	78,41	0,89	0,35
Obwód przodostopia [mm]	267,78	274,97	7,19	2,03
Wysokość palucha [mm]	23,59	23,68	0,09	0,72
Kąt ustawienia palucha [°]	83,77	87,41	3,64	0,74
Kąt ustawienia palca V-go [°]	81,78	83,06	1,28	1,02
Obwód przez kostkę [mm]	261,73	261,94	0,21	0,93
Wysokość podbicia [mm]	66,61	68,73	2,12	2,80
Wysokość łuku podłużnego [mm]	14,95	11,58	-3,37	3,54
Wysokość kostki zewn. [mm]	55,58	55,62	0,04	0,37
Obwód przez podbicie [mm]	259,33	265,61	6,28	3,32
Obwód przez piętę [mm]	343,42	350,52	7,10	3,02
Obwód łydki [mm]	365,1	365,27	0,17	0,17
Kąt Clarke'a [°]	45,36	42,82	-2,54	2,09

ciążonych, tj. w pozycji siedzącej, przy swobodnym opuszczeniu stóp, bez dotykania podłoża, a następnie dla stóp dociążonych, tj. w pozycji stojącej. Wyniki zarejestrowane z wykorzystaniem metody klasycznej oraz cyfrowej dla stopy odciążonej i dociążonej, tj. wartości średnie oraz wskaźnik rozrzutu od wartości średniej (SD – odchylenie standardowe) przedstawiono w tabeli 1.

Kolejna seria pomiarów dotyczyła zarejestrowania zmian parametrów antropometrycznych stóp po wysiłku. Uzyskane wyniki badań po wysiłku w odniesieniu do stóp odciążonych (w pozycji siedzącej) i dociążonych, rejestrowanych w pozycji stojącej przedstawiono w tabeli 2.

Przedstawione w tabelach 1 – 2 zmierzone wartości wybranych parametrów antropometrycznych miały na celu umożliwienie dokonania porównania dokładności ich rejestracji przy zastosowaniu klasycznej metody pomiaru, polegającej na wykonaniu na papierze odbitki stóp oraz me-

tydy cyfrowej, zakładającej wykorzystanie skanera 3D i wspomagających aplikacji komputerowych. Stwierdzono, że wyniki są porównywalne, jednak za pomocą skanera 3D wykonane szybciej, a także dokładniej (w odniesieniu do szczegółowości odczytu). Wartości parametrów dla stóp dociążonych są wyższe niż dla stóp odciążonych. Ponadto większość wymiarów stóp zgodnie z przypuszczeniami była większa po wysiłku zarówno dla stóp odciążonych, jak i obciążonych. Wyjątek stanowią wysokość łuku podłużnego i kąt Clarke'a, których wartości po wysiłku zmalały (dla stopy odciążonej i obciążonej). W celu określenia istotności różnic w wymiarach stopy ochotników przed i po wysiłku przeprowadzono porównanie uśrednionych wartości liczbowych oraz określono istotność statystyczną różnic pomiędzy nimi. Wykorzystano w tym celu test t-Studenta, porównując średnie wartości z pomiarów przeprowadzonych za pomocą skanera 3D przed i po eksperymencie.

Przyjęto poziom istotności testu alfa = 0,05, dla którego wartości poniżej zmiennej t-Studenta przy liczbie stopni swobody k = 54 stanowiły podstawę odrzucenia hipotezy zerowej, zakładającej równość średnich.

Wyniki uwzględniające wartości zarejestrowane z wykorzystaniem metody cyfrowej przedstawiono w tabeli 3. (stopa odciążona, badana w pozycji siedzącej) oraz w tabeli 4. (stopa dociążona, badana w pozycji stojącej).

Uzyskane na podstawie obrazów 3D, metodą skanowania, wymiary antropometryczne stóp ochotników badań wymagały wcześniejszego przygotowania obrazów cyfrowych, a następnie przeprowadzenia wieloetapowej obróbki cyfrowej, uwzględniającej takie etapy, jak:

- selekcja pojedynczych obrazów wykorzystanych do utworzenia obrazu 3D polegająca na usunięciu obrazów wykazujących duże odchylenia i błędy zapisu

- rejestracja wstępna i dokładna z uwzględnieniem tekstury i geometrii dla pojedynczych obrazów z wykorzystaniem elementów wspólnych tworzonej bryły 3D

- łączenie, wygładzanie i scalanie pojedynczych obrazów w celu utworzenia obiektu 3D

- filtrowanie małych obiektów i wypełnianie ubytków i wolnych przestrzeni

- upraszczanie siatki węzłów MESH

- wygładzanie bryły końcowej 3D

- zapis w formacie cyfrowym zgodnym z narzędziami wykorzystywanymi do dalszej obróbki i analizy cyfrowej

- wprowadzenie osi współrzędnych i płaszczyzn odniesienia do identyfikacji oraz przeprowadzenia pomiarów antropometrycznych

- wskazanie punktów granicznych do wyznaczenia długości i obwodów dla powierzchni bryły 3D

- obliczanie wymiarów dla zaznaczonych przekrojów i odcinków.

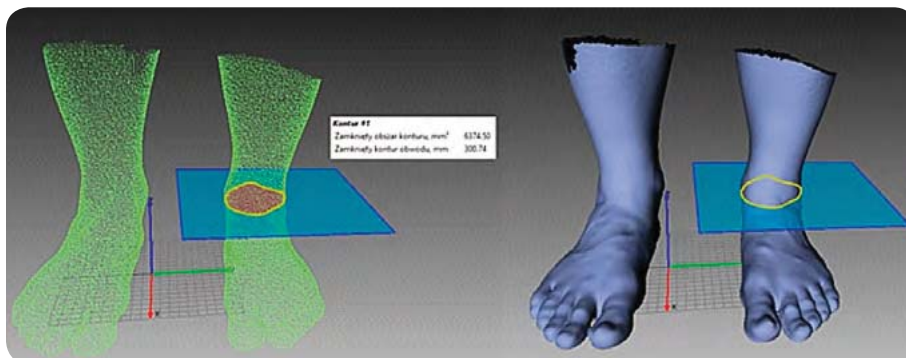
Chociaż początkowo jest to zadanie pracochłonne, czas jego realizacji rekompensowany jest z nawiązką, ponieważ raz wprowadzone dane są później automatycznie wykorzystywane przez oprogramowanie.

Wyznaczanie wymiarów stóp ochotników badań na podstawie zarejestrowanych i przygotowanych obrazów 3D przedstawiają następujące rysunki:

- obwód przez kostkę (rys. 11.)
- obwód przodostopia/stopy (rys. 12.)
- nanoszenie punktów kluczowych na planotokonturogram stopy w celu wyznaczenia kątów, co realizowane jest interaktywnie w programie komputerowym (rys. 13.)
- szerokość przodostopia/stopy (rys. 14.).

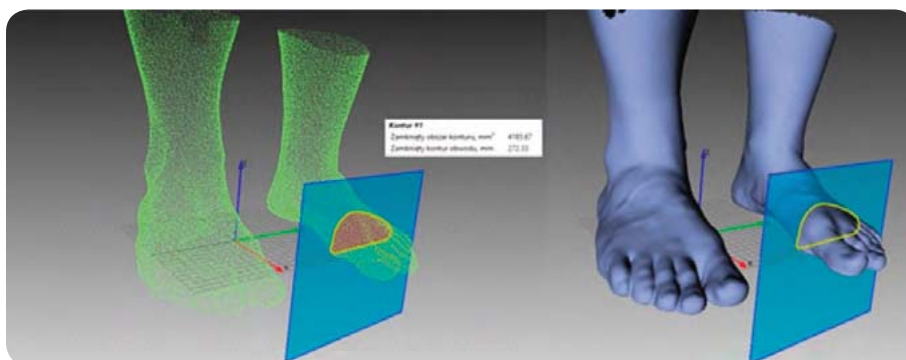
Podsumowanie

Zarejestrowane obrazy trójwymiarowe oraz ich cyfrowa obróbka umożliwiły porównanie dokładności wymiarów antropometrycznych zbieranych tradycyjnie, tj. z wykorzystaniem odbitek stóp oraz cyfrowo – z wykorzystaniem skanera 3D. Jakość rejestracji za pomocą technik cyfrowych, w porównaniu z analogowymi meto-



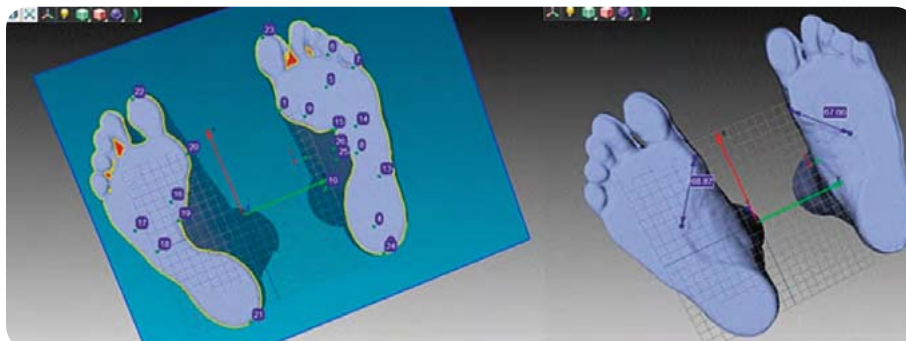
Rys. 11. Obliczanie obwodu kostki na podstawie obrazu 3D stopy. Lewy wariant przedstawia obraz chmury punktów uzyskany ze skanowania, a prawy wypełniony za pomocą specjalnego oprogramowania. Do celów pomiaru wystarczy użycie jednego z nich, najlepiej ostatecznego

Fig. 11. Calculating ankle perimeter on the basis of a 3D foot image. The left variant shows an image of cloud of points acquired throughout the scanning, and the right variant was created with the use of the special program. For the purpose of measurement any of the above-mentioned variants can be used.



Rys. 12. Wyznaczanie obwodu przodostopia na podstawie obrazu 3D stopy

Fig. 12. Determining forefoot perimeter on the basis of a 3D foot image



Rys. 13. Zaznaczanie punktów i prostych na plantokonturogramie stopy do obliczania kątów

Fig. 13. Marking points and straight lines on the foot footprint for calculating angles



Rys. 14. Wyznaczanie szerokości przodostopia na podstawie obrazu 3D stopy

Fig. 14. Determining forefoot width on the basis of a 3D foot image

dami pomiarów, jest istotnie wyższa w przypadku rejestrowania parametrów antropometrycznych, co zostało potwierdzone w badaniach; było również omawiane przez innych autorów [10].

Zaproponowana metodyka badań, uwzględniająca rejestrację obrazów 3D zarówno przed, jak i po użytkowaniu obuwia, pozwoliła na ocenę zmian wymiarów antropometrycznych stóp w wyniku obciążenia fizycznego. Oczywiście, metoda klasyczna również to umożliwia, niemniej, jak już zaznaczono w treści artykułu, z mniejszą dokładnością i zabiera więcej czasu. Co więcej, metoda cyfrowa jest wygodniejsza, ze względu na możliwość szybkiego archiwizowania obrazów w pamięci komputera. Wyniki pomiarów antropometrycznych przed i po wysiłku w odniesieniu do stóp, pomimo zauważalnych zmian (wzrost parametrów) po wysiłku, nie wykazały istotnych statystycznie różnic wartości średnich w zakresie badanych parametrów dla stopy odciążonej. W przypadku stopy dociążonej istotne różnice wymiarów zaobserwowano dla siedmiu parametrów (zaznaczono je kolorem żółtym w tabeli 4.). Zauważalne są jednak zakresy zmian poszczególnych parametrów, co wskazuje na konieczność stosowania przez użytkowników wyrobów o różnych rozmiarach i kształtach.

Wykonywanie obuwia „na miarę” dla każdego użytkownika nie zawsze jest uzasadnione ekonomicznie. Można jednak wykorzystać zaproponowaną metodę do stworzenia baz danych, które mogą służyć do modelowania i optymalizacji obuwia z uwagi na różne kryteria. Świadczy to o możliwości szerokiego wykorzystania naukowego i praktycznego zaproponowanych pomiarów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dyrektywa 89/686/EWG dotycząca środków ochrony indywidualnej
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla środków ochrony indywidualnej. Dz.U. Nr 259, poz. 2173
- [3] Peng F., Sweeney D., Delamore P. *Digital Innovation in Fashion How to „Capture” the User Experience in 3D Body Scanning.* "IJEM" 2012, Vol. 3, No 4:233-240
- [4] Kyung S.H. and Ashdown S.P. *An Exploratory Study of the Validity of Visual Fit Assessment From Three-Dimensional Scans.* "Clothing & Textiles Research Journal" 2010, Vol. 28., No. 4
- [5] Galantucci L.M., Percoco G., Di Gioia E. *Photogrammetric 3D Digitization of Human Faces Based on Landmarks.* Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009, Vol. 1, IMECS 2009, March 18 – 20, Hong Kong
- [6] Koutny D., Palousek D., Koutecky T., Zatočilova A., Rosický J., Janda M. *3D Digitalization of the Human Body for Use in Orthotics and Prosthetics.* World Academy of Science, Engineering and Technology 2012, Vol. 6
- [7] <http://www.e-prototypy.pl/oferta/skanowanie3d>
- [8] Jeffrey O., Stull G. *When it comes to PPE, size matters.* "Fire Rescue News" 2012, 25, 10 (<http://www.firerescue1.com/print.asp?act=print&vid=1359841-when-it-comes-to-ppe-size-matters>, dostęp online 29.10.2014)
- [9] Hrynyk R., Frydrych I., Cichocka A. *Wykorzystanie technik skanowania 3D w celu lepszego dopasowania ŚOI – na przykładzie sprzętu ochrony układu oddechowego.* „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2016, 533, 2:18-22
- [10] Strzecha K. *Diagnostyka stóp i równowagi – konieczność łączenia anatomii z biomechaniką.* Materiały z VIII Ogólnopolskiej Konferencji Polskiego Towarzystwa Fizjoterapii, Kraków-Wrocław, listopad 2012