

三维成像扫描在上肢尺寸测量中的应用研究

李鹏, 孙义, 毋荣, 孙剑端, 刘雯雯, 张雯, 乔霞霞, 李霖锋, 王龙虎*

兵器工业总医院康复医学科, 陕西 西安

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月18日; 发布日期: 2026年4月27日

摘要

目的: 定量评价三维成像扫描方法对人体上肢的周径、长度、体积测量的实用性、简便性及准确性, 并与传统测量方法比较分析。方法: 前瞻性纳入31名受试者进行上肢尺寸研究, 利用3D扫描系统装置对上肢尺寸扫描、感兴趣区域选取、模型封装及计算机软件系统绘制, 获得三维扫描相关数据; 将这些数据与传统软尺测量的周径、长度进行比较, 同时与目前常用“水置换法”体积测量结果对比分析, 以进一步验证三维扫描测量结果的准确性。结果: 周径测量结果显示, 软尺测量组与三维扫描组的腕围测量 $[(16.13 \pm 1.50) \text{ cm vs } (16.25 \pm 1.77) \text{ cm}, P > 0.05]$ 、肘围 $[(25.10 \pm 2.63) \text{ cm vs } (25.91 \pm 2.73) \text{ cm}, P > 0.05]$ 结果无差异; 长度测量结果中, 两组 $[(30.10 \pm 1.69) \text{ cm vs } (30.15 \pm 1.92) \text{ cm}, P > 0.05]$ 有99.8%的一致性; 体积测量两组 $[(1206.01 \pm 306.94) \text{ cm}^3 \text{ vs } (1224.54 \pm 300.09) \text{ cm}^3, P > 0.05]$ 结果无差异。结论: 三维成像扫描方法具有操作简单、非接触式测量及可任意选取测量部位等特点, 在肢体周径、长度及体积方面与传统测量结果相当。

关键词

三维扫描, 肢体, 尺寸, 排水法

A Study on the Application of Three-Dimensional Imaging Scanner in Upper Limb Dimensional Measurement

Peng Li, Yi Sun, Rong Wu, Jianduan Sun, Wenwen Liu, Wen Zhang, Xiaxia Qiao, Jifeng Li, Longhu Wang*

Department of Rehabilitation Medicine, Norinco General Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: March 23, 2026; accepted: April 18, 2026; published: April 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李鹏, 孙义, 毋荣, 孙剑端, 刘雯雯, 张雯, 乔霞霞, 李霖锋, 王龙虎. 三维成像扫描在上肢尺寸测量中的应用研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 4728-4734. DOI: 10.12677/acm.2026.1641744

Abstract

Objective: To quantitatively evaluate the practicality, simplicity, and accuracy of 3D imaging scanning methods for measuring the circumference, length, and volume of the human upper limb, and to compare and analyze these results with traditional measurement methods. **Method:** Prospectively, 31 subjects were included in the study for upper limb dimension analysis. A 3D scanning system was used to scan the upper limb dimensions, select regions of interest, encapsulate the model, and generate data through computer software. These data were then compared with traditional tape measurements of circumference and length, as well as with the commonly used “water displacement method” for volume measurement, to further validate the accuracy of the 3D scanning measurements. **Results:** The measurement results showed no significant differences between the tape measurement group and the 3D scanning group in terms of wrist circumference [(16.13 ± 1.50) cm vs (16.25 ± 1.77) cm, $P > 0.05$] or elbow circumference [(25.10 ± 2.63) cm vs (25.91 ± 2.73) cm, $P > 0.05$]. The length measurements between the two groups [(30.10 ± 1.69) cm vs (30.15 ± 1.92) cm, $P > 0.05$] were 99.8% consistent, with higher precision. Additionally, there was no significant difference in volume measurements between the two groups [(1206.01 ± 306.94) cm³ vs (1224.54 ± 300.09) cm³, $P > 0.05$]. **Conclusion:** The 3D imaging scanning method is characterized by its simplicity of operation, non-contact measurement, and the ability to select any measurement site. It is comparable to traditional measurement methods in terms of limb circumference, length, and volume.

Keywords

Three-Dimensional Scanning, Limb, Size, Drainage Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人体尺寸的测量在健康与医疗领域非常重要，精确的肢体尺寸参数对于(淋巴)水肿、肌容积等评估具有指导意义[1]。由于各种疾病、事故等因素的影响，四肢运动功能障碍患者数量与日俱增，尤其上肢功能在日常生活自理、家务劳动、办公学习等方面起着重要角色[2]。目前常用的肢体体积测量方法包括水置换法、生物阻抗谱、多普勒超声检查、CT及MRI等[3][4]。其中，基于阿基米德原理的水置换法被认为是肢体体积测定的传统黄金标准。然而这种方法操作过程耗时且繁琐，并且为确保每位受试者间不发生交叉感染而必须进行换水流程，极大增加了操作的复杂度[5]。生物阻抗谱方法并不是直接测量肢体体积，而是通过测量组织的电阻抗特性，因此，常常依赖于假设模型来推断体积或其他参数，且受到温度、湿度、皮肤状况等影响[6][7]。多普勒超声检查也并非直接测量肢体体积，而是通过测量血流速度、血管直径等参数来间接推断肢体的某些信息，临床上更多应用于三维容积超声评估孕期胎儿部分肢体体积[8]。而CT、MRI则由于费用、时间、患者依从性、辐射及其他因素，在临床上难以广泛开展应用[9]。总之，目前现有的体积测量方法具有一定局限性，因此，亟需对其测量方法及结果准确性进行进一步研究。

三维(3D)扫描技术是一种能够快速获取物体表面形状信息，并将其转换为数字模型的技术[10]。体表三维扫描技术在医疗领域也有巨大应用潜力，尤其在颌面部手术[11]、乳房整形[12]、腹部畸形[13]等定

量研究中。虽然将三维扫描技术应用于上肢体积测量方面的研究有不少报道[14][15]，但目前同时用于评估上肢其他尺寸(如周径、长度)的测量研究较少，而传统肢体周长和长度测量主要为卷尺测量[16][17]。因此，本研究目标是将三维成像扫描技术应用于上肢周长、长度及体积的测量，并对可操作性、精确度进行研究，通过与传统测量方法的结果比较，评价该方法在肢体尺寸测量中的效果。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

本研究共纳入 31 名受试者，所有受试者在入选前均排除了上肢皮肤相关疾病。每位受试者均接受传统尺寸测量和三维扫描测量，每次测量均重复进行两次以确保数据可靠性。

2.2. 方法

2.2.1. 上肢周径测量

测试者采取站立或坐直，上肢自然下垂，选择两个常用的测量部位进行周径测量[18]，其中肢体远端周径测量点为桡骨茎突水平，近端测量点为尺骨鹰嘴顶点近侧 10 cm 处(约上臂中下 1/3 交界水平)。分别采用传统软尺与三维扫描技术测量上肢周径，并对两种方法的结果进行比较分析。

2.2.2. 上肢长度测量

测试者采取站立或坐直，上肢自然下垂，根据上肢周长测量标准确定测量点[19](远端测量点为桡骨茎突水平、近端测量点为尺骨鹰嘴顶点近侧 10 cm 处中点)，分别采用传统软尺和三维扫描技术测量两点间的直线距离，并将该距离作为上肢长度的测量值。

2.2.3. 水置换方法上肢体积测量

为了评估三维扫描的有效性和可靠性，本研究采用传统体积测量“金标准”——水置换方法[4]。测量方法为：选择合适容量的量筒，向其中注满自来水，水温 25℃~32℃ (水的密度约 0.99 g/cm³)。受试者需先用肥皂水清洁上臂并自然晾干表面水分，在感兴趣区两端(与周长测量的两端标记点一致)标记参考点。缓慢将上肢完全浸入水中，确保肢体表面无气泡附着。当远端标记点完全浸入后，静置数秒使水面稳定，记录此时电子秤的初始重量 G_1 。继续缓慢将上肢完全浸入水中直至近端标记点完全浸没，静置数秒后记录电子秤的最终重量 G_2 。对上肢重复测量两次，以验证水置换法的可靠性。

$$\text{上肢体积}(V) = \frac{\text{最终重量}(G_2) - \text{初始重量}(G_1)}{\rho}$$

其中， ρ 为水的密度(0.99 g/cm³)。

2.2.4. 三维扫描上肢体积测量

对于上肢体积测量，本研究采用标记点对感兴趣部位进行体表标记，而非限定于肢体的百分比或解剖标志，以与水置换法的测量部位保持一致。具体扫描方法：室温 18℃~25℃ 之间，测试者使用手持式 3D 扫描系统装置(SHINING 3D, 先临三维, 浙江)进行操作。将扫描仪硬件通过 USB 连接到计算机上，打开软件系统前按照制造商提供的指导对扫描仪进行校准，并设置常规扫描参数。扫描前对受试者进行肢体清洗清洁并自然晾干；在感兴趣区域(同水置换法标记点)粘贴标记物。数据采集：受试者保持上臂固定不动；测量者手持扫描仪围绕上肢匀速旋转 360°，获取全周表面数据。扫描完成后，通过配套软件对原始扫描数据进行模型封装及体积计算，最终生成三维体积测量结果。

2.3. 统计学方法

应用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析。计量资料用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 组间比较采用单因素方差分析(ANOVA); 计数资料以率(%)表示, 组间比较采用 Wilcoxon 秩和检验及 χ^2 检验。P < 0.05 表示存在有统计学意义。

3. 结果

3.1. 一般资料分析

本研究共 31 名参与者, 其中 12 名为女性, 19 名为男性。所有受试者均顺利完成全部测量项目, 无中途退出或测量失败情况。见表 1。

Table 1. General information of subjects

表 1. 受试者一般资料

参与人数	平均年龄(岁)	身高(cm)	体重(Kg)	BMI (Kg/m ²)
31	28.42 ± 0.12	167.11 ± 8.43	62.67 ± 11.17	21.99 ± 2.83

3.2. 周径与长度测量结果分析

本研究对两种测量方法所得肢体长度数据进行了对比分析(表 2), 结果显示: 在周径测量方面, 传统软尺测量组腕围、肘围均值与三维扫描组结果接近, 组间差异无统计学意义(P > 0.05)。在长度测量方面, 软尺测量组的平均长度为(30.10 ± 1.69) cm, 三维扫描组为(30.15 ± 1.92) cm, 两组平均长度的绝对差值仅为 0.05 cm。统计学分析表明, 两组数据分布高度重合(重合度 99.8%), 且组间差异无统计学意义(P > 0.05)。见表 2。图 1 为三维扫描测量过程。

Table 2. Upper limb body measurements results

表 2. 上肢肢体尺寸测量结果

组别	腕围(cm)	肘围(cm)	上肢长度(cm)
软尺测量组	16.13 ± 1.50	25.10 ± 2.63	30.10 ± 1.69
三维扫描组	16.25 ± 1.77	25.91 ± 2.73	30.15 ± 1.92
组间 t 值	0.53	0.98	0.08
组间 P 值	0.82	0.33	0.93

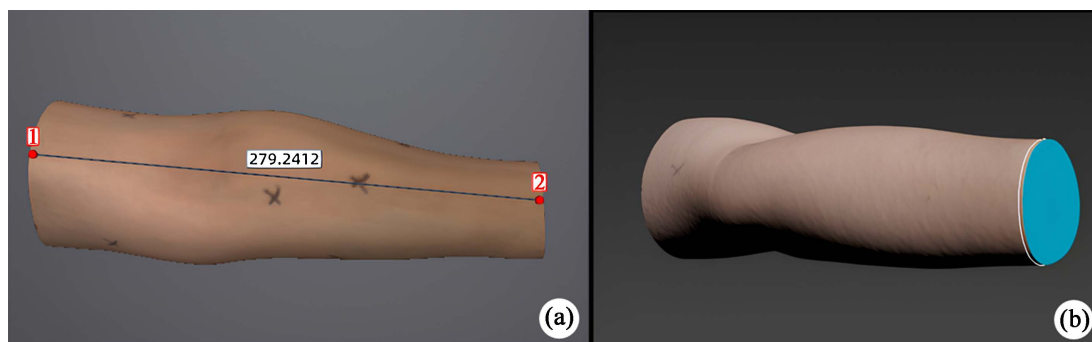


Figure 1. 3D scanning of upper limb dimensions

图 1. 三维扫描组上肢尺寸

3.3. 体积测量结果分析

体积测量结果显示(表 3), 水置换法测得平均体积为 $(1206.01 \pm 306.94) \text{ cm}^3$, 三维扫描法为 $(1224.54 \pm 300.09) \text{ cm}^3$, 绝对差异值为 18.53 cm^3 , 两者相差 1.53%。统计学分析表明, 两种方法间具有高度一致性(组内相关系数 0.991), 组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。测量过程见图 2 (a 为传统测量过程, b~d 为三维扫描测量过程及结果)。

Table 3. Upper limb volume measurement results

表 3. 上肢肢体体积测量结果

组别	上肢体积(cm^3)
软尺测量组	1206.01 ± 306.94
三维扫描组	1224.54 ± 300.09
组间 t 值	0.19
组间 P 值	0.84

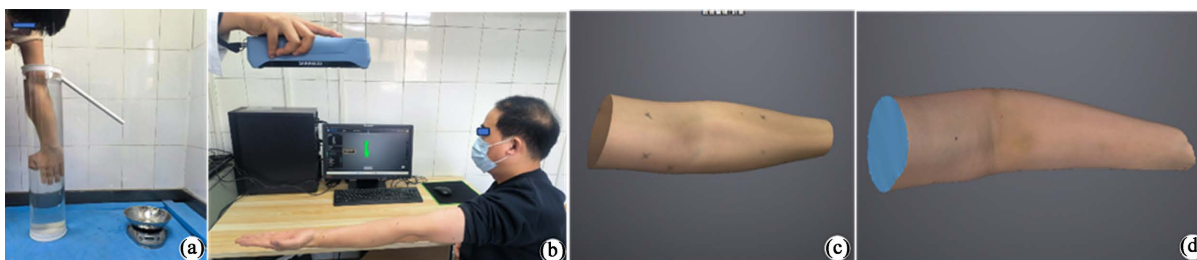


Figure 2. Upper limb volume measurement

图 2. 上肢体积测量

4. 讨论

三维人体测量技术自 20 世纪 80 年代问世以来, 因其非接触式测量优势被广泛应用于多个领域, 包括人体数据库建立、服装量体定制、人体工程学、医学以及博物馆陈列等。为实现对上肢肢体尺寸的精准测量, 本研究采用三维扫描仪进行肢体周径、长度及体积测量, 并与传统软尺法、排水法进行比较。结果显示, 三维扫描法与传统软尺测量两种方法间无统计学差异, 在长度测量方面具有高度一致性(相关系数为 0.998), 且标准差更小(1.69 vs 1.92), 表明三维扫描技术在肢体长度测量中不仅与传统方法高度一致, 且因非接触式和数字化测量方式, 可提供更精确的结果。在体积测量方面, 两种方法结果一致性达 99%, 且精度更高; 值得注意的是, 三维扫描法在维持与水置换法 99% 数据一致性的同时, 其测量离散度(标准差 $SD = 300.09 \text{ vs. } 306.94$)更低, 提示该技术可显著降低人工读数误差, 展现出更优的可重复性。结合淋巴水肿领域的现有研究, 目前针对肢体体积测量的最小临床重要差异(Minimal Clinically Important Difference, MCID)尚无统一标准, 但临床上通常将肢体体积差异 $\geq 5\% \sim 10\%$ 或绝对体积差 $\geq 100 \sim 200 \text{ ml}$ (上肢) 视为有意义的水肿进展或治疗反应。本文中两种测量方法的平均体积差异为 18.53 cm^3 , 该差异仅占典型肢体体积的 1.53%, 远小于临床干预阈值, 因此即使差异显著, 也不影响临床决策。

本研究过程中发现, 传统软尺测量肢体周径、长度时, 操作者手法至关重要[20], 如松紧度、定位偏差时会影响测量结果; 三维扫描测量的周径结果稍高于软测, 主要考虑其测量原理导致的差异, 而非随机误差或单纯的“细节捕捉差异”, 传统软尺测量采用接触式测量, 测量时不可避免会对软组织产生轻微压迫(尤其针对水肿部位或软组织较丰富的测量区域), 导致测量值存在轻微低估; 而三维扫描采用非接

触式光学扫描技术, 通过多视角图像拼接重建三维模型, 全程不接触测量对象, 可完整保留软组织的自然形态, 不会因压迫导致形态改变, 因此测得的周径和体积值略大于传统方法。此外, 水置换法操作时水箱是否完全被注满[21]、水位是否波动以及受试者肢体是否可以持续保持稳定等均会影响测试结果; 三维扫描法为非接触式、非人工读数可以有效避免上述情况产生的误差。如 Retrouvey H 等[22]应用该技术测量体表总烧伤面积时发现, 其可显著提升测量精度, 且与经验丰富的外科医生评估结果具有高度一致性。Powers OA [23]通过 3D 扫描仪进行下肢测量以制备踝足矫形器, 对比分析显示三维扫描与手工测量结果无统计学差异, 证明其在精确度上的显著优势。此外, 三维扫描所测得的数据可以保留创面、色素沉着等皮肤贴图纹理信息, 重测数据可做直观对比以评价治疗效果[24] [25]。

本研究由于受限于样本量小, 仅有 31 名受试者同意参与本研究。尽管样本量有限, 但招募的群体代表了不同性别、年龄阶段人群, 因此研究结果仍具有一定的普遍意义。本研究的不足是该三维扫描仪由于照射的是普通光, 因此测试需避免外界光线的影响, 以防扫描数据的缺失, 但就该测量方法而言, 可以满足对人体肢体尺寸测量的要求。未来, 随着毫米波成像、红外深度传感、激光扫描等技术的不断进步, 三维扫描技术将成为人体测量领域的重要发展方向。

声 明

本研究已通过兵器工业总医院伦理委员会批准(批件号: 202503111419000406423)。所有受试对象均已签署知情同意书, 并对研究内容知情同意。

参考文献

- [1] Tur, J.A. and Bibiloni, M.D.M. (2019) Anthropometry, Body Composition and Resting Energy Expenditure in Human. *Nutrients*, **11**, Article 1891. <https://doi.org/10.3390/nu11081891>
- [2] Battraw, M.A., Fitzgerald, J., Joiner, W.M., James, M.A., Bagley, A.M. and Schofield, J.S. (2022) A Review of Upper Limb Pediatric Prostheses and Perspectives on Future Advancements. *Prosthetics & Orthotics International*, **46**, 267-273. <https://doi.org/10.1097/pxr.000000000000094>
- [3] Yau, L.K., Henry, F., Man Hong, C., Amy, C., Wai Kwan Vincent, C., Ping Keung, C., et al. (2022) Swelling Assessment after Total Knee Arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Surgery*, **30**, 1-10. <https://doi.org/10.1177/10225536221127668>
- [4] Farina, G., Galli, M., Borsari, L., Aliverti, A., Paraskevopoulos, I.T. and LoMauro, A. (2024) Limb Volume Measurements: A Comparison of Circumferential Techniques and Optoelectronic Systems against Water Displacement. *Bioengineering*, **11**, Article 382. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11040382>
- [5] Man, I.O.W., Markland, K.L. and Morrissey, M.C. (2010) The Validity and Reliability of the Perometer in Evaluating Human Knee Volume. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, **24**, 352-358. <https://doi.org/10.1111/j.1475-097x.2004.00577.x>
- [6] Hirata, K., Ito, M., Nomura, Y., Kawashima, C., Tsuchiya, Y., Ooba, K., et al. (2022) Muscle Quality Indices Separately Associate with Joint-Level Power-Related Measures of the Knee Extensors in Older Males. *European Journal of Applied Physiology*, **122**, 2271-2281. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05005-2>
- [7] Fenech, M. and Jaffrin, M.Y. (2004) Extracellular and Intracellular Volume Variations during Postural Change Measured by Segmental and Wrist-Ankle Bioimpedance Spectroscopy. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, 166-175. <https://doi.org/10.1109/tbme.2003.820338>
- [8] Wu, X., Niu, Z., Xu, Z., Jiang, Y., Zhang, Y., Meng, H., et al. (2021) Fetal Weight Estimation by Automated Three-Dimensional Limb Volume Model in Late Third Trimester Compared to Two-Dimensional Model: A Cross-Sectional Prospective Observational Study. *BMC Pregnancy and Childbirth*, **21**, Article No. 365. <https://doi.org/10.1186/s12884-021-03830-5>
- [9] Yang, J.C., Wu, S., Wang, Y., Luo, S., Kuo, S.C., Chien, P., et al. (2022) Effect of Lymphaticovenous Anastomosis on Muscle Edema, Limb, and Subfascial Volume in Lower Limb Lymphedema: MRI Studies. *Journal of the American College of Surgeons*, **235**, 227-239. <https://doi.org/10.1097/xcs.000000000000236>
- [10] White, B.N., Lu, I.M., Kao, L.S., Dixon, J.B., Weiler, M.J., Frank, N.D., et al. (2020) An Infrared 3D Scanning Device as a Novel Limb Volume Measurement Tool in Breast Cancer Patients. *World Journal of Surgical Oncology*, **18**, Article

- No. 278. <https://doi.org/10.1186/s12957-020-02043-y>
- [11] Gallardo, Y.N.R., Salazar-Gamarra, R., Bohner, L., De Oliveira, J.I., Dib, L.L. and Sesma, N. (2023) Evaluation of the 3D Error of 2 Face-Scanning Systems: An *in Vitro* Analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **129**, 630-636. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.06.049>
- [12] White, B.N., Okoli, J., Dixon, J.B., Yuan, L., Yang, S. and Gabram-Mendola, S.G.A. (2021) Use of a Portable Infrared 3D Scanning Device Measuring Limb Volume in a Safety Net Hospital Breast Clinic. *The Breast Journal*, **27**, 559-561. <https://doi.org/10.1111/tbj.14221>
- [13] Kudzia, P., Jackson, E. and Dumas, G. (2022) Estimating Body Segment Parameters from Three-Dimensional Human Body Scans. *PLOS ONE*, **17**, e0262296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262296>
- [14] Ashby, J., Lewis, M., Sunderland, C., Barrett, L.A. and Morris, J.G. (2023) The Reliability and Validity of a Portable Three-Dimensional Scanning System to Measure Leg Volume. *Sensors*, **23**, Article 9177. <https://doi.org/10.3390/s23229177>
- [15] Taniguchi, M., Hirono, T., Nakayama, T., Kobayashi, K. and Ichihashi, N. (2021) Assessment of Edematous Changes Using Three-Dimensional Body Scanning and Segmental-Bioelectrical Impedance Spectroscopy. *Lymphatic Research and Biology*, **19**, 524-530. <https://doi.org/10.1089/lrb.2020.0087>
- [16] Cerqueira, M.S., Santos Borges, L., dos Santos Rocha, J.A., Brito Andrade, H., Silva Pirôpo, U., Lupato Conrado, L.A., et al. (2015) Twelve Hours of a Compression Sleeve Is Not Enough to Improve the Muscle Recovery of an Exercise-Damaged Upper Arm. *Apunts. Medicina de l'Esport*, **50**, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.apunts.2014.07.003>
- [17] Tan, C., Coutts, F. and Bulley, C. (2013) Measurement of Lower Limb Volume: Agreement between the Vertically Oriented Perometer and a Tape Measure Method. *Physiotherapy*, **99**, 247-251. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2012.12.004>
- [18] Edmond, T., Laps, A., Case, A.L., O'Hara, N. and Abzug, J.M. (2020) Normal Ranges of Upper Extremity Length, Circumference, and Rate of Growth in the Pediatric Population. *HAND*, **15**, 713-721. <https://doi.org/10.1177/1558944718824706>
- [19] Oza, C., Pargaonkar, Y., Dunna, D., Gondhalekar, K., Khadilkar, V. and Khadilkar, A. (2022) Validation of Mid-Upper-Arm-Circumference Cut-Offs for Assessment of Overnutrition in Indian Children and Adolescents with Type 1 Diabetes. *Primary Care Diabetes*, **16**, 466-470. <https://doi.org/10.1016/j.pcd.2022.03.006>
- [20] Llanos, C., Gan, E.Y., Chen, J., Lee, M.J., Kilbreath, S.L. and Dylke, E.S. (2020) Reliability and Validity of Physical Tools and Measurement Methods to Quantify Hand Swelling: A Systematic Review. *Physical Therapy*, **101**, pzaa206.
- [21] Houwen, F., Stemkens, J., de Schipper, P.J., van der Wouw, P., Heitink, M. and van Langen, H. (2022) Estimates for Assessment of Lymphedema: Reliability and Validity of Extremity Measurements. *Lymphatic Research and Biology*, **20**, 48-52. <https://doi.org/10.1089/lrb.2019.0082>
- [22] Retrouvey, H., Chan, J. and Shahrokhi, S. (2018) Comparison of Two-Dimensional Methods versus Three-Dimensional Scanning Systems in the Assessment of Total Body Surface Area Estimation in Burn Patients. *Burns*, **44**, 195-200. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2017.07.003>
- [23] Powers, O.A., Palmer, J.R. and Wilken, J.M. (2022) Reliability and Validity of 3D Limb Scanning for Ankle-Foot Orthosis Fitting. *Prosthetics & Orthotics International*, **46**, 84-90. <https://doi.org/10.1097/pxr.0000000000000066>
- [24] Zhao, M., Kawahara, J., Abhishek, K., Shamanian, S. and Hamarneh, G. (2022) Skin3D: Detection and Longitudinal Tracking of Pigmented Skin Lesions in 3D Total-Body Textured Meshes. *Medical Image Analysis*, **77**, Article 102329. <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102329>
- [25] Varallo, A., Sarno, A., Castriconi, R., Mazzilli, A., Loria, A., del Vecchio, A., et al. (2022) Fabrication of 3D Printed Patient-Derived Anthropomorphic Breast Phantoms for Mammography and Digital Breast Tomosynthesis: Imaging Assessment with Clinical X-Ray Spectra. *Physica Medica*, **98**, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.04.006>