引文格式：伍靖雯,邹进贵,周涛,等. 室内遮挡环境下超宽带测距误差影响因素分析与改正[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 128-132. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.028

室内遮挡环境下超宽带测距误差影响因素分析与改正

伍靖雯[1]，邹进贵[1*]，周　涛[1]，曾文浩[2]，赵　静[2]，刘　丹[2]
（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430079；2. 湖北省自然资源厅应急测绘保障中心，湖北 武汉 430071）

摘　要：针对室内实际场景的复杂性，深入分析了室内环境下不同障碍物对超宽带测距精度的影响，并通过控制变量法研究了超宽带穿透障碍物时的入射角、真实距离、穿透介质厚度及其相对介电系数，在此基础上建立了穿透改正模型。结果表明，介质厚度及其相对介电系数是影响超宽带穿透误差的重要因素；穿透改正模型适用于墙体、玻璃和木板，改正后的测距值与真值之差均不超过2 cm；在定位精度要求分米级或米级的室内场景，可忽略玻璃和木板（厚度不超过3 cm）带来的测距误差影响。

关键词：超宽带；测距误差；穿透改正模型；控制变量法
中图分类号：P225　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0128-05

Influence Factor Analysis and Correction of Ultra-wideband Ranging Errors in Indoor Obstructed Environment

WU Jingwen[1], ZOU Jingui[1], ZHOU Tao[1], ZENG Wenhao[2], ZHAO Jing[2], LIU Dan[2]
(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Emergency Surveying and Mapping Support Center, Department of Natural Resources of Hubei Province, Wuhan 430071, China)

Abstract: According to the complexity of indoor scenes, we provided a detailed analysis of the impact of different obstacles on the accuracy of ultra-wideband (UWB) ranging in indoor environments. We used the controlled variable method to analyze the incidence angle, real distance, thickness of penetrating medium and its relative permittivity when UWB signals penetrated obstacles. And then, we established a penetration correction model. The results indicate that the thickness and relative permittivity of medium are significant influence factors. The penetration correction model is applicable to walls, glass, and wooden boards, with the difference between corrected ranging values and true values not exceeding 2 cm. In indoor scenarios where meter or decimeter-level positioning accuracy is required, the influence of UWB ranging errors caused by glass and wooden boards (with thicknesses not exceeding 3 cm) can be disregarded.

Key words: UWB, ranging error, penetration correction model, controlled variable method

随着5G和物联网的流行，基于位置的服务逐渐成为新的经济增长点和战略性新兴产业[1]。人们的日常活动大部分在室内进行，因此室内位置信息的获取至关重要。目前的室内定位技术包括无线局域网、无线射频识别、蓝牙、惯性测量单元、视觉、超宽带（UWB）等[2-3]，其中UWB技术因多路径分辨能力强、穿透能力强、功耗较低、定位精度和测距精度可达分米级甚至厘米级的优点，被广泛应用于室内高精度位置服务，备受学术研究和产业应用的青睐[4-6]。UWB测距方式包括基于飞行时间、基于到达时间差、基于到达角度以及基于接收信号强度等[7-8]。非视距（NLOS）误差是影响UWB测距精度的主要因素之一。在NLOS环境下，发射信号在传播过程中受到障碍物阻挡，通过反射、衍射和穿透（折射）到达接收天线，导致传播时间延长、能量衰减。室内环境障碍物多且复杂多变，因此研究室内不同障碍物对测距精度的影响，分析室内穿透介质后的测距误差，并通过模型改正测距值，可以解决UWB定位中的障碍物遮挡问题。为处理UWB室内定位中的NLOS误差，近年来部分学者[9-14]提出了一系列方法，但这些方法大多未对室内遮挡环境下UWB信号测距误差的影响因素进行深入探讨。分析室内环境中的障碍物对UWB测量误差的影响，对于提高室内定位的精度和推动室内定位系统的发展具有重要的研究意义和应用价值。因此，

项目来源：国家自然科学基金资助项目（41871373）；湖北省自然科学基金计划资助项目（2024AFB166）；湖北省自然资源厅科研计划资助项目（ZRZY2024KJ40）。
第一作者简介：伍靖雯（2000—），硕士，研究方向为超宽带技术，E-mail：wujingwen@whu.edu.cn。
通信作者：邹进贵（1972—），博士，教授，博士生导师，研究方向为精密工程测量、变形监测、多传感器集成的测量方法，E-mail：jgzou@sgg.whu.edu.cn。

本文探究了室内环境下UWB信号穿透墙体、玻璃、木板等主要障碍物时，影响UWB测距稳定性和精度的因素，建立了相应的测距改正模型，并通过实验验证了该模型的准确性。

1　UWB测距原理

UWB系统采用双向飞行时间法测量标签与锚节点的距离，可有效避免时钟同步问题[15-16]。具体表现为：锚节点在某一时刻向标签发射脉冲响应信号，标签接收信号，对信号进行处理，并向锚节点反馈信号，锚节点记录接收反馈信号时间，由此计算得到飞行时间，进而计算锚节点与标签之间的距离。

2　UWB穿透改正模型

UWB穿透室内障碍物的信号属于NLOS信号，对应的测距误差与障碍物相关。基于此，本文建立了室内环境下的UWB穿透改正模型。UWB信号属于电磁波信号，通过电磁波折射来展示信号穿墙的过程[17]（图1），设备在 A 点发射的信号以入射角 θ_1 入射到墙表面 C 点，折射角为 θ_2，在墙表面 D 点穿墙而出，传播到 B 点，信号从 A 点到 B 点的传播路径在距离上可等效为 A' 到 B 的直线路径。

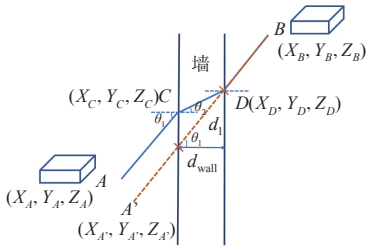


图1　UWB信号穿透传播路径示意图

真空和介质中电磁波的传播速度分别为：

$$c=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \tag{1}$$

$$v=\frac{1}{\sqrt{\mu\times\varepsilon}}=\frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}=\frac{c}{n} \tag{2}$$

$$n=\sqrt{\mu_r\varepsilon_r} \tag{3}$$

式中，ε_0、μ_0 为电磁波在真空中的介电常数和磁导率；ε、μ 为电磁波在介质中的介电常数和磁导率；ε_r、μ_r 为介质的相对介电系数和相对磁导率，介质为无机材料时，$\mu_r\approx1$。

墙内的等效传播距离为：

$$d_1=\frac{d_{\text{wall}}}{\cos\theta_1} \tag{4}$$

信号在墙内的额外传播时间为：

$$\Delta t=\frac{d_1}{v}-\frac{d_1}{c}=\frac{d_1}{c/\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}-\frac{d_1}{c}=\frac{d_1}{c/\sqrt{\varepsilon_r}}-\frac{d_1}{c}=\frac{d_1}{c}\left(\sqrt{\varepsilon_r}-1\right) \tag{5}$$

对应的额外传播距离为：

$$\Delta d=\Delta t\times c=(\sqrt{\varepsilon_r}-1)d_1=(\sqrt{\varepsilon_r}-1)\frac{d_{\text{wall}}}{\cos\theta_1} \tag{6}$$

式中，d_{wall} 为墙体厚度；θ_1 为入射角。

由模型可知，Δd 由入射角、介质厚度及其相对介电系数共同决定，均匀介质的相对介电系数可通过表1获取[18]。室内环境常见的遮挡物包括墙体、玻璃、木板等，墙体主要由混凝土构成，其介电系数与混凝土接近。由于木板和墙体的相对介电系数在一个范围内，因此需提前测定实验环境中二者的相对介电系数。对于介质均匀的障碍物，Δd 由入射角、介质厚度及其相对介电系数决定，但部分学者认为也与标签与锚节点之间的真实距离有关[17]。为保障实验的严谨性，本文验证时涉及的实验变量包括入射角、介质厚度、介质介电系数以及标签与锚节点的真实距离。

表1　部分常见物质的相对介电系数

气体/液体	介电系数	固体	介电系数
真空	1	木板	2~4
空气	1.005 85	玻璃	4.1
水蒸气	1.007 85	混凝土	约2~8
水	81.5	大理石	6.2

3　实验与结果分析

3.1　玻璃遮挡环境下测距真值对UWB穿透误差的影响

探究UWB穿透误差与测距真值之间的关系，需严格控制其他3个变量保持不变。标签和锚节点位于玻璃两侧，固定标签，控制锚节点向后沿直线移动；利用全站仪测得锚节点与标签天线相位中心的三维坐标，通过坐标反算得到二者之间的距离，将其作为测距真值。为控制变量，整个实验过程中UWB信号始终穿透同一介质（玻璃），标签与锚节点始终位于同一高度（入射角不变，为0），共计进行13组实验（测距真值依次递增10 cm）。在剔除3倍中误差的基础上，计算每组数据的标准差（STD）和测距均值，并与测距真值进行比较，统计穿透误差（表2）。结果表明，在玻璃遮挡环境下，随着测距真值的变化，UWB穿透误差的范围为0~5 cm，变化趋势不明显，穿透误差与测距真值不存在明显的相关性；从整体上看，STD最大不超过1 cm，内符合精度较好；STD随距离的增加变化不大，比较稳定，因此可近似认为测距真值对UWB穿透误差没有影响。

表2 测距真值对UWB穿透误差的影响/cm

实验组	测距真值	测距均值	穿透误差	STD
1	29.25	30.88	1.63	0.32
2	42.39	44.57	2.18	0.37
3	52.70	55.80	3.10	0.38
4	67.67	72.07	4.40	0.30
5	81.00	85.57	4.57	0.21
6	96.67	99.30	2.63	0.24
7	109.89	111.17	1.28	0.20
8	122.35	123.83	1.48	0.26
9	137.33	139.07	1.74	0.18
10	150.64	151.92	1.28	0.35
11	163.95	165.62	1.67	0.35
12	175.75	178.75	3.00	0.10
13	188.74	189.91	1.17	0.30

3.2 玻璃遮挡环境下入射角对UWB穿透误差的影响

探究UWB穿透误差与入射角之间的关系，同样严格控制其他3个变量保持不变。当锚节点与标签之间的水平距离不变时，入射角增大测距真值也会增大，因此入射角改变时，水平距离也要随之改变。如图2所示，入射角最大为30°，玻璃厚度为2 cm，共进行12组实验。采用相同方法对UWB测距值进行处理，记录每组实验的入射角、测距真值、测距均值、穿透误差和STD（表3），整个实验过程需要人为改变入射角，因此难以精准控制水平距离的变化量，测距真值略有不同，真值之差控制在5 cm以内。结果表明，随着入射角的增大，穿透误差变化不明显，不同入射角对信号穿透障碍造成的误差基本相同；STD基本保持不变，最大不超过1.5 cm，整个实验数据的内符合精度良好，因此可近似认为UWB穿透误差与入射角无关，将 d_1 近似用 d_{wall} 代替。



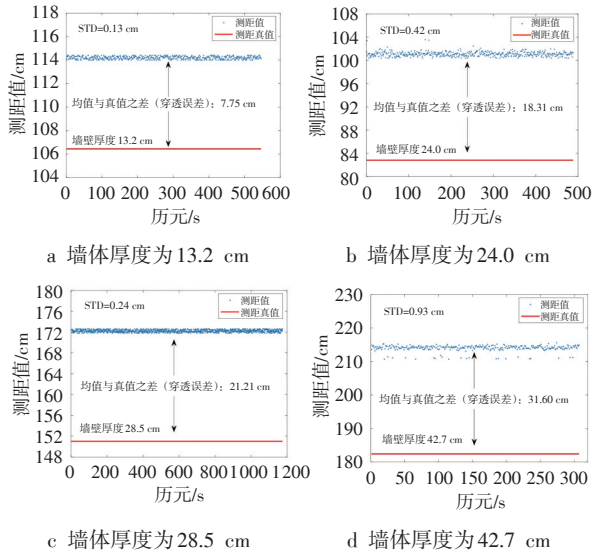
图2 UWB入射角影响实验场景

3.3 穿透介质对UWB穿透误差的影响

通过上述实验可知，UWB穿透误差只与穿透介质有关，而与穿透介质相关的影响因素包括介质厚度和相对介电系数。室内常见的障碍物包括墙体、玻璃、木板等。室内的墙体厚度一般不超过50 cm，本文选取了4个厚度（13.2、24.0、28.5、42.7 cm）的墙体进行实验，结果见图3，可以看出，不同厚度的墙体对应的穿透误差不同，初步说明了穿透误差可能与介质厚度有关。墙体的相对介电系数为2~8，提前测定得到实验环境下4个厚度墙体的相对介电系数为2.95，实验设备位于同一高度，计算得到 Δd。经过计算发现，Δd 与穿透误差接近，表明该模型适用于墙体介质。

表3 入射角对UWB穿透误差的影响

实验	入射角/(°)	测距真值/cm	测距均值/cm	穿透误差/cm	STD/cm
1	0.02	140.89	142.43	1.54	0.21
2	5.09	138.36	140.84	2.47	0.21
3	7.36	138.78	144.87	6.09	0.36
4	10.19	138.92	144.75	5.83	0.35
5	11.88	138.76	144.62	5.86	0.42
6	14.29	137.64	140.24	2.60	0.36
7	16.79	139.59	145.33	5.74	0.23
8	18.91	142.62	145.16	2.54	0.21
9	22.08	140.43	143.16	2.74	0.21
10	24.90	139.36	142.08	2.72	0.19
11	28.05	140.83	143.85	3.03	0.21
12	30.04	137.91	140.76	2.84	0.36



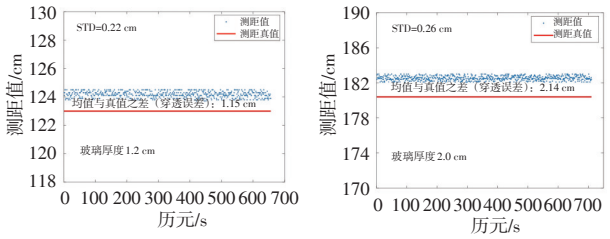
a 墙体厚度为13.2 cm　b 墙体厚度为24.0 cm

c 墙体厚度为28.5 cm　d 墙体厚度为42.7 cm

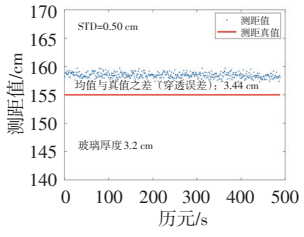
图3 穿透误差与墙体厚度之间的关系

玻璃厚度通常在3 cm以内，本文选取了3个厚度（1.2、2.0、3.2 cm）的玻璃进行实验，结果见图4，可以看出，玻璃厚度不同时，穿透误差也不同。利用玻璃厚度和相对介电系数计算得到的 Δd 与穿透误差近似相等，进一步验证了介质厚度是UWB穿透误差的重要影响因素以及该模型同样适用于玻璃介质。

本文选取了3个厚度（1.8、2.8、3.2 cm）的木板进行实验，结果见图5，可以看出，不同厚度的木板对应的穿透误差也不同。事先测定实验环境下木板的相对介电系数为3.5，计算得到的 Δd 与穿透误差较接近，说明该模型也适用于木板介质。

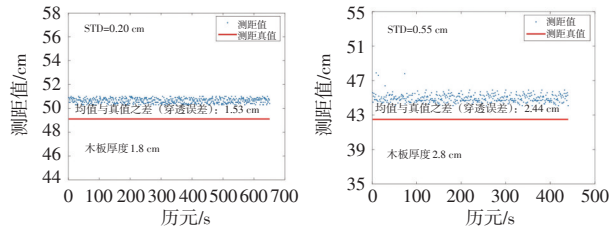


a 玻璃厚度为1.2 cm　　b 玻璃厚度为2.0 cm

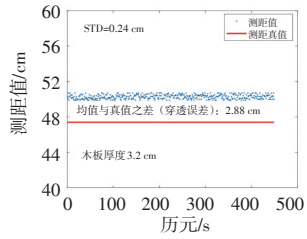


c 玻璃厚度为3.2 cm

图4　穿透误差与玻璃厚度之间的关系



a 木板厚度为1.8 cm　　b 木板厚度为2.8 cm



c 木板厚度为3.2 cm

图5　穿透误差与木板厚度之间的关系

墙体、玻璃、木板的穿透改正结果见表4，可以看出，3种介质对应的改正后测距值与真值之差（改正差）均不超过2 cm，模型改正效果良好；同时，介质的相对介电系数不同，对应的模型改正值也不同，因此介质的相对介电系数也是影响穿透误差的主要因素。

表4　不同介质的穿透模型改正结果统计表/cm

穿透介质	穿透介质厚度	穿透介质相对介电系数	改正值	原始测距值	改正后测距值	测距真值	改正差
墙体	13.20	2.95	9.47	114.19	104.72	106.45	−1.73
	24.00		17.22	101.11	83.89	82.80	1.09
	28.50		20.45	172.19	151.74	151.01	0.73
	42.70		30.64	214.18	183.54	182.40	1.14
玻璃	1.20	4.10	1.23	124.15	122.92	123.00	−0.08
	2.00		2.05	182.51	180.46	180.40	0.06
	3.20		3.28	158.42	155.14	155.00	0.14
木板	1.80	3.50	1.57	50.67	49.10	49.10	0.00
	2.80		2.44	44.94	42.50	42.50	0.00
	3.20		2.79	50.28	47.50	47.40	0.10

综上所述，基本可以认定介质厚度和相对介电系数是影响UWB穿透误差的主要因素，且在障碍物为墙体、玻璃和木板时，可通过本文提出的穿透改正模型对测距值进行改正。由于介质为玻璃时对应的改正值与其本身厚度大致相同，且室内场景中玻璃的厚度一般不超过3 cm，因此对于定位精度要求不高（分米级或米级）的室内场景，可忽略玻璃带来的测距误差影响。类似，对于厚度不超过3 cm的木板，也可采用相同的处理方式。

4　结　语

探讨室内环境下UWB信号穿透障碍的传播特性可以有效提高室内定位精度。本文探究了在UWB信号穿透障碍物时，真实距离、入射角、障碍物厚度及其相对介电系数对UWB穿透误差的影响。结果表明，障碍物厚度及其相对介电系数是重要的影响因素，在此基础上建立了UWB信号穿透改正模型，以修正测距值。实验结果证明，该模型在介质为墙体、玻璃和木板时表现出一定的可行性。此外，在利用UWB进行室内定位时，若定位精度要求在分米级或米级，可忽略玻璃和木板（厚度小于3 cm）带来的测距误差影响。然而，模型在推导过程中存在变量近似代替的情况，若要更准确地反映UWB信号传播特性，需要进一步研究变量的具体相关性，并对模型进行优化；还需考虑该模型是否适用于室内环境下其他类型的障碍物，以扩展其应用范围。

参考文献

[1] 刘振耀. 基于UWB/GNSS/MIMU的室内外无缝定位技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2017

[2] 景仙林,魏永虎. 自回归的卡尔曼滤波算法在UWB定位中

的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(5):117-119
[3] Al-Ammar M A, Alhadhrami S, Al-Salman A, et al. Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms[C]. IEEE International Conference on Cyberworlds. Santander, Cantabria, Spain, 2014:245-252
[4] 赵胤植,邹进贵,蔡礼贤,等. 一种顾及电子元件延迟的超宽带室内定位方法[J]. 测绘通报,2022(4):1-5
[5] 赵红梅,赵杰磊. 超宽带室内定位算法综述[J]. 电信科学,2018,34(9):130-142
[6] 任东宇,任东旭,张元. 基于UWB和Skyline的室内三维实时定位技术研究[J]. 地理空间信息,2017,15(8):113-115
[7] 陈燕. 基于UWB的高精度室内三维定位技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018
[8] 文铠. 基于超宽带的室内定位与定向关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2020
[9] Yang X, Wang J, Song D, et al. A Novel NLOS Error Compensation Method Based IMU for UWB Indoor Positioning System[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9):11 203-11 212
[10] Cui Z, Gao Y, Hu J, et al. LOS/NLOS Identification for Indoor UWB Positioning Based on Morlet Wavelet Transform and Convolutional Neural Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 25(3):879-882
[11] Mao C, Lin K, Yu T, et al. A Probabilistic Learning Approach to UWB Ranging Error Mitigation[C]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018:1-6
[12] 王长强,徐爱功,隋心. UWB测距的NLOS误差削弱方法[J]. 导航定位学报,2017,5(3):24-27
[13] 盛坤鹏,王坚. 超宽带NLOS测距误差改正模型[J]. 北京测绘,2020,34(2):250-254
[14] 王川阳,王坚,余航,等. 测距误差改正的超宽带定位系统研究[J]. 测绘科学,2019,44(1):98-103
[15] Wang J, Wang M, Yang D, et al. UWB Positioning Algorithm and Accuracy Evaluation for Different Indoor Scenes[J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2021, 12(3):203-225
[16] Zhao Y, Zou J, Guo J, et al. A Novel Ultra-wideband Double Difference Indoor Positioning Method with Additional Baseline Constraint[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2021, 10(10):634
[17] 贾骏超. 超宽带室内定位中NLOS误差抑制方法探讨[J]. 导航定位学报,2017,5(2):60-64
[18] 宰昶丰,郭英,叶瑾,等. 基于UWB穿墙定位中NLOS误差的优化方法[J]. 电子测量技术,2021,44(19):128-133

(上接第95页)

[2] 吴双品,马劲松,佘江峰. 一种基于隐式表征的即时实景三维重建与神经渲染方法[J]. 测绘科学,2024,49(4):147-158
[3] 常远,盖孟. 基于神经辐射场的视点合成算法综述[J]. 图学学报,2021,42(3):376-384
[4] Mildenhall B, Srinivasan P P, Tancik M, et al. NeRF[J]. Communications of the ACM, 2020(65):99-106
[5] Kerbl B, Kopanas G, Leimkuehler T, et al. 3D Gaussian Splatting for Real-time Radiance Field Rendering [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2023(42):1-14
[6] 孙海迅,罗健欣,张艳艳,等. 基于图像的三维重建典型技术综述[J]. 软件导刊,2023,22(9):9-24
[7] 郑太雄,黄帅,李永福,等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报,2020,46(4):631-652
[8] Lin J, Li Z, Tang X, et al. VastGaussian: Vast 3D Gaussians for Large Scene Reconstruction [J]. ArXiv, 2024(abs/2402. 17427):1-12
[9] Wei P C, Yan L, Xie H, et al. LiDeNeRF: Neural Radiance Field Reconstruction with Depth Prior Provided by LiDAR Point Cloud[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024(208):296-307
[10] 肖祎龙,邓伊琴,陈志刚. 面向动态三维人体重建的神经辐射场加速方法[J/OL]. 计算机工程(2024-06-14) [2024-07-26]. https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0069317
[11] 赵斯杰,肖罡,戴璐祎,等. 多视图像三维重建技术及其创新应用发展[J]. 信息技术与信息化,2023(7):90-92
[12] Chen Y W, Chen Z L, Zhang C, et al. Gaussian Editor: Swift and Controllable 3D Editing with Gaussian Splatting [J]. ArXiv, 2023(abs/2311. 14521):1-16
[13] Liu W, Guan T, Zhu B, et al. EfficientGS: Streamlining Gaussian Splatting for Large-scale High-resolution Scene Representation [J]. ArXiv, 2024(abs/2404. 12777):1-9
[14] 李吉洋,程乐超,何靖璇,等. 神经辐射场的研究现状与展望[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2024,36(7):995-1 013
[15] Gu'edon A, Lepetit V. SuGaR: Surface-aligned Gaussian Splatting for Efficient 3D Mesh Reconstruction and High-quality Mesh Rendering [J]. ArXiv, 2023(abs/2311. 12775):1-13