

基于阈值分析的曲线拟合和边缘检测生猪侧视点云补全

李孟飞^{1,2} 康熙^{1,2} 王彦超^{1,2} 陈珏³ 张馨月^{1,2} 刘刚^{1,2}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对基于深度相机的生猪体尺检测中,生猪胸围、腹围因栏杆遮挡而无法准确测量的问题,本文提出一种基于阈值分析的三次 B 样条曲线拟合和边缘检测相结合的方法,实现对侧视点云缺失区域的补全。对 DK 深度相机采集到的模型猪左侧原始点云数据进行预处理,采用直通滤波、体素网格下采样、统计滤波及欧氏聚类等方法提取生猪的侧视点云。对侧视点云进行切片、阈值分析、投影,拟合得到曲线拟合之后的补全点云。对侧视点云进行边缘检测得到边缘点云,对边缘点云的缺失区域进行拟合补全,得到完整的边缘点云,将曲线拟合之后的补全点云与边缘点云进行对比分析,剔除超出边缘的补全点云得到最终补全点云。最后,分别对未补全点云、补全点云进行体尺测点的自动化提取和人工提取,比较点云补全前后体尺测点的提取误差。试验结果表明,通过本文方法对腹部缺失点云进行补全后,腹围测点的提取误差由 1.54 cm 降至 0.64 cm,对胸部缺失点云补全后,胸围测点的提取误差由 3.41 cm 降至 0.89 cm。

关键词: 生猪体尺检测; 点云补全; 三次 B 样条; 阈值分析; 边缘检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0081-08

Side-view Point Cloud Completion Method Combining Cubic B-spline Curve Fitting and Edge Detection Based on Threshold Analysis

LI Mengfei^{1,2} KANG Xi^{1,2} WANG Yanchao^{1,2} CHEN Jue³ ZHANG Xinyue^{1,2} LIU Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem that the breast and belly circumference of pigs cannot be accurately measured due to the barriers of the railing in the study of pig body size detection based on depth camera, a method of combining cubic B-spline curve fitting and edge detection based on threshold analysis was proposed, to achieve the completion of the missing area of the side-view point cloud. The original point cloud data on the left side of the fake pig collected by the DK depth camera was preprocessed, and the side-view point cloud of the pig was extracted by methods such as straight-through filtering, voxel grid down-sampling, statistical filtering and Euclidean clustering. Perform slicing, threshold analysis, projection, and fitting of the side-view point cloud were carried out to obtain the complementary point cloud after curve fitting, and then edge detection was performed on the side-view point cloud to obtain the edge point cloud, and the missing part of the edge point cloud was fitted and complemented to obtain a complete edge point cloud, the complementary point cloud after curve fitting was analyzed and compared with the edge point cloud, and the complementary point cloud was removed beyond the edge to obtain the final side-view complementary point cloud. Automatic extraction and manual extraction of body size measurement points were performed on the uncompleted point cloud and the complete point cloud

收稿日期: 2021-07-10 修回日期: 2021-08-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700204)
作者简介: 李孟飞(1998—),男,硕士生,主要从事基于点云的三维重建技术在健康养殖中的应用研究,E-mail: limengfei58@163.com
通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术农业应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

respectively. The experimental results showed that after completing the missing point cloud of the abdomen by the method, the selection error of the abdominal measurement point was reduced from 1.54 cm to 0.64 cm. After the missing point cloud of the chest was completed, the selection error of the chest measurement point was reduced from 3.41 cm to 0.89 cm. The research results can provide a method for the side-view point cloud completion of pigs.

Key words: pig body measurement; point cloud completion; cubic B-spline; threshold analysis; edge detection

0 引言

在生猪的生长发育过程中,生猪的体尺参数往往能够反映其生长发育状况,可以作为衡量生猪生长发育的重要指标^[1]。传统的生猪体尺测量多采用人工手动测量,如使用皮尺进行测量。这种测量方法需要直接与猪体接触,容易引起疾病的传播,且易使猪受到应激,影响其生长发育^[2]。使用机器视觉技术可以实现无接触的生猪体尺快速测量^[2-4]。

国内外已有很多关于运用机器视觉技术进行牲畜体尺测量的研究,且取得了一定的进展^[5-11]。运用机器视觉技术进行体尺的自动化检测过程中,往往会遇到部分点云缺失的问题,点云缺失会影响到后续的点云配准以及体尺测点的提取,进而降低生猪体尺的测量精度。面对这个问题国内外学者对点云补全算法进行了研究,且取得了重要进展^[12-19]。点云的缺失不仅使三维模型的可视化范围受限,而且对后期的点云处理产生影响^[12]。WANG等^[13]使用移动的最小二乘法并根据点云模型的几何形状对点云孔洞区域进行了拟合重建。MAHDAOW等^[14]用正交梯度法求解径向基函数在任意曲面上的偏微分方程,实现了网格模型中缺失区域的补全。QUINSAT等^[15]将数值模型的先验知识定义为名义网格,识别数字化空洞,然后计算名义网格和点云之间的差异,实现了点云空洞的修复。王凡^[16]对机器学习中介向基函数进行改进,实现了点云修复。岳杰^[17]改进了植物边缘处理方法,通过对特征点云进行拼接实现了植物点云的修复。初梦苑^[18]采用不同步的一帧侧视点云,实现了奶牛侧视点云的修复,但没有考虑到不同帧深度图中奶牛的姿态差异。牛金玉^[19]对三次B样条曲线拟合方法进行改进,实现了奶牛侧视点云缺失区域的补全,但其没有对切片点云序列之间距离进行判断,只能实现在一定方向一段缺失点云的补全。

针对生猪侧视点云被遮挡时体尺测点提取精度较低的问题,本文提出基于阈值分析的三次B样条曲线拟合和边缘检测相结合的方法实现侧视点云的补全,保留点云的原始特征,降低体尺测点的提取误差。

1 材料与方法

1.1 侧视点云获取

分别于2021年1月18日、3月9日、4月28日在中国农业大学信息与电气工程学院教学楼,利用微软新一代DK深度相机的NFOV2X2装箱模式采集模型猪的视频数据。视频包含深度数据和彩色数据,帧率为30 f/s。模型猪放置在两栏杆的中间位置,栏杆长度为1.5 m,高度为0.9 m,间距为1 m。DK深度相机距地面0.4 m、距模型猪左侧栏杆1.2 m,如图1所示。DK深度相机的x轴与栏杆平行,y轴垂直于地面。试验采集了模型猪不同身体部位被栏杆遮挡的视频数据。通过ffmpeg工具对视频数据进行分帧处理,并提取其中的深度信息保存为460像素×576像素的16位深度图像。



图1 模型猪视频数据采集平台

Fig.1 Fake pig video data collection platform

1.2 侧视点云提取

由于采集到的点云数据包含栏杆、地面、天花板和离群点等无用信息^[2,8],并且点云数据量较大,为提取出有效、平滑的模型猪侧视点云数据,提高后续点云的处理速度,本文通过Microsoft Visual Studio 2019软件、OpenCV 4.2(跨平台计算机视觉和机器学习软件库)、PCL 1.10.1(点云库)对采集到的点云数据进行预处理,如图2所示。图2a为模型猪的原始点云。对该点云进行一系列的处理,方法如下:

- (1)对深度图像进行感兴趣区域裁剪,裁剪得到包含栏杆和模型猪的感兴趣区域,再将其转换为点云,如图2b所示。
- (2)利用直通滤波对点云进行处理,将无关的

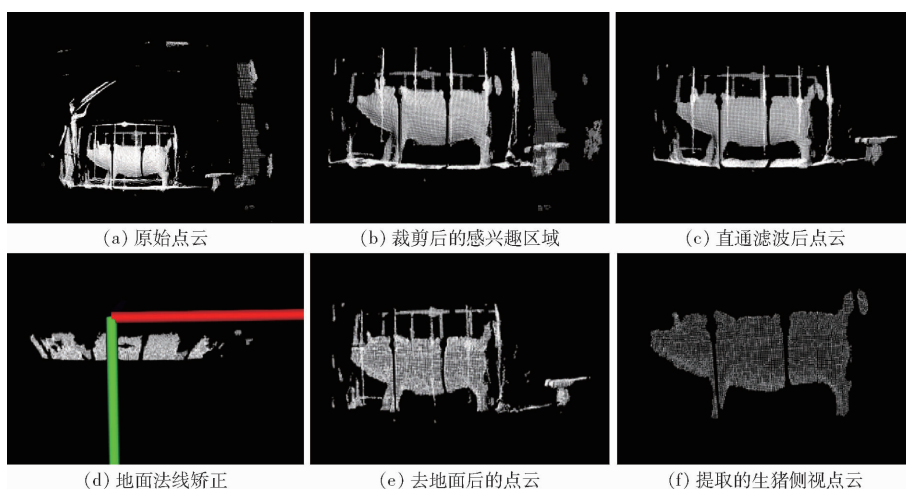


图2 侧视点云的预处理

Fig. 2 Preprocessing of side-view point cloud

背景点云去除,直通滤波之后的点云如图 2c 所示。

(3) 利用体素化网格的方法对点云进行下采样处理,网格大小设置为 $0.01f \times 0.01f \times 0.01f$ 。

(4) 利用随机采样一致性的平面分割算法,提取地面点云,通过地面点云的法向量对相机坐标系进行矫正,如图 2d 所示。

(5) 采用统计滤波将点云中的离群信息进行剔除。

(6) 通过欧氏聚类的方法,提取模型猪的侧视点云,如图 2f 所示。对侧视点云进行 PCA 分析后得到侧视点云的坐标系。

1.3 侧视点云补全

经过预处理之后的模型猪侧视点云存在着部分点云的缺失,且缺失区域均为连通的区域^[19],将会对后续的点云配准、体尺测点提取产生影响。本文提出了一种基于阈值分析的三次 B 样条曲线拟合和边缘检测相结合的方法对侧视点云进行补全。首先对模型猪的侧视点云沿着 Z 轴进行切片,然后将其投影到 YOZ 平面上,通过旋转平移矩阵将切片点云转换到 XOY 平面上,然后对切片点云进行三次 B 样条曲线拟合,将拟合后的点云序列转换到原来坐标系得到曲线拟合之后的补全点云,曲线拟合之后的补全点云可能存在过拟合现象,最后通过侧视点云的边界对曲线拟合之后的补全点云进行约束,对超出边界的点云进行剔除,得到最终的补全点云。

1.3.1 基于阈值分析的三次 B 样条曲线拟合方法

由于侧视点云在 X 轴方向上存在大量点云缺失,曲线拟合的方法能够通过缺失区域附近的点云信息对缺失区域进行拟合,实现对缺失区域的补全。由于样条曲线易出现过拟合的现象^[20],而三次 B 样条曲线具有局部性、凸包性等性质,可以通过 4 个点拟合一段曲线,且不会出现过拟合现象^[21],所以本

文选用此方法进行点云的补全。

B 样条曲线的计算式为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i F_{i,n}(t) \quad (1)$$

其中

$$F_{i,n}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{k-i} (-1)^j C_{n+1}^j (t+n-i-j)^n \quad (2)$$

式中 P_i ——控制曲线的特征点

$F_{i,n}(t)$ —— n 阶 B 样条基数

三次 B 样条曲线方程的基函数为

$$\begin{cases} F_{0,3}(t) = \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ F_{1,3}(t) = \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ F_{2,3}(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \\ F_{3,3}(t) = \frac{1}{6}t^3 \end{cases} \quad (3)$$

把基函数式(3)代入式(1)得到三次 B 样条曲线方程为

$$P(t) = P_0 F_{0,3}(t) + P_1 F_{1,3}(t) + P_2 F_{2,3}(t) + P_3 F_{3,3}(t) \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (4)$$

三次 B 样条曲线拟合可分为近似拟合和插值拟合,近似拟合不通过特征点,插值拟合通过特征点,由于点云切片所得到的点云并非单独的一列点云,用差值拟合算法容易出现局部过拟合现象,所以本文选择近似拟合的方式,设置特征点个数为 10。

点云的缺失区域基本沿着 X 轴方向,并且缺失区域两侧均有点云,所以可以通过缺失点云左右两侧的点云信息来对缺失点云进行补全^[19]。点云补全方法如图 3 所示。

基于阈值分析的三次 B 样条曲线拟合方法如下:

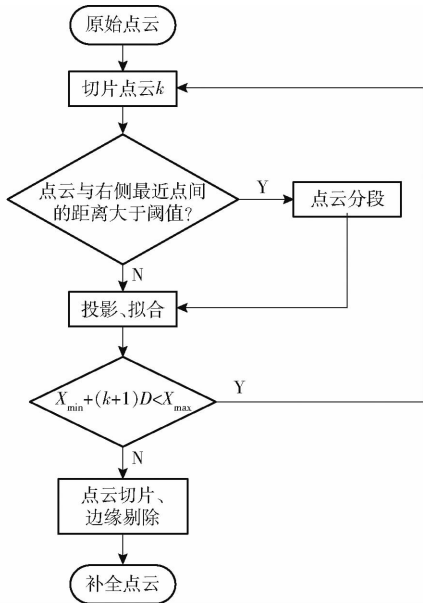


图 3 侧视点云补全方法流程图

Fig. 3 Flowchart of side-view point cloud completion method

(1) 求出点云在 X 轴方向上的最大值 $X_{\max}$ 、最小值 $X_{\min}$ ，计算得出点云的平均密度 D 。

(2) 以 X 轴最小值 $X_{\min}$ 为起点，最大值 $X_{\max}$ 为终点，每间隔 D 对点云进行切片。切片点云的份数为： $N = \left\lceil \frac{X_{\max} - X_{\min}}{D} \right\rceil$ ，第 k 个采样区间为 $[X_{\min} + (k - 1)D, X_{\min} + kD]$ ，其中 $k \in N^*$ ，且 $k \leq N$ 。

(3) 将切片点云沿 Z 轴方向由小到大进行排序，即将无序的切片点云转换为有序点云。计算点云与之右侧最近邻点之间的欧氏距离，若距离超出所设置的阈值，则将点云序列进行分段，再对每段点云分别进行拟合。由于相机视角原因，导致侧视点云上半部分缺失较为严重，下半部分点云缺失较轻，并且腹部和腿之间存在着一定的距离，为尽量降低对点云特征点的影响，将侧视点云分为上下两个部分，上半部分阈值设置为 9 cm，下半部分阈值设置为 5 cm。

(4) 计算切片点云的数量，若点云数量小于 10，则将该切片点云舍去。将点云数量不小于 10 的切片点云投影到 YOZ 平面上，再通过旋转平移矩阵，将其转换到 XOY 平面上，再对点云序列进行拟合，得到新的点云序列，再将其转换到原始坐标系，将新点列转换到原始空间时 Y 轴的坐标设置为采样区间中点，即 $y'_k = X_{\min} + (k - 0.5)D$ 。曲线拟合的效果如图 4 所示。

1.3.2 边缘检测

对原始的侧视点云进行边界提取，如图 5a 所示。由于点云边界存在着缺失，首先沿 Z 轴在 X 轴中间位置截取点云序列，判断点云缺失区域，将点云

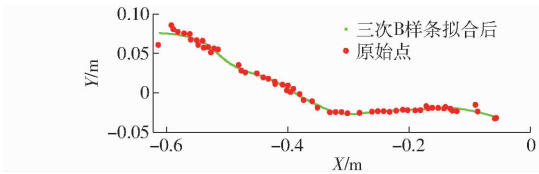


图 4 三次 B 样条曲线拟合效果

Fig. 4 Fitting effect of cubic B-spline curve

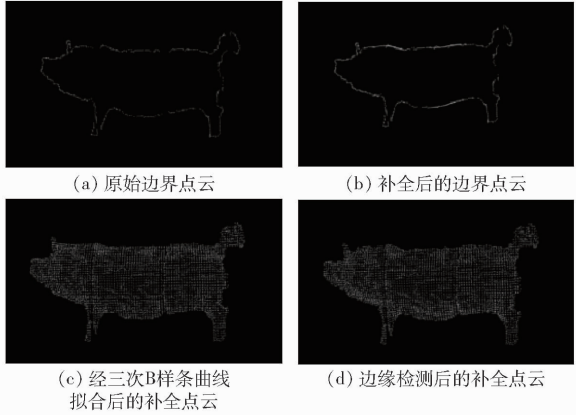


图 5 基于边缘检测的点云剔除

Fig. 5 Point cloud removal based on edge detection

缺失区域的左侧点作为点云缺失位置，然后在点云缺失位置左侧取 10 cm，右侧取 16 cm，对边界点云进行三次 B 样条曲线拟合，补全后的边界点云如图 5b 所示。

将基于阈值分析的三次 B 样条曲线拟合后的补全点云(图 5c)同边界点云沿 X 轴方向进行切片，将边界点云 X 轴方向上 X 的平均值设为阈值，将曲线拟合后的补全点云超出边界点云阈值的点进行剔除，得到最终的补全点云，如图 5d 所示。由图 5c 可以看出，曲线拟合补全后的补全点云虽然对缺失的点云进行了补全，但是点云的一些特征如耳根、前肢腋部等因曲线的拟合而丢失，边缘检测后的补全点云，因其与点云的边界进行比较，对超边界区域进行了裁剪，所以仍保留了原始点云的多数特征。

2 结果与讨论

2.1 点云配准效果试验

胸围、腹围、体高是生猪重要的体尺参数，是生猪表型的重要组成部分，也可作为选种育种方面的重要指标。并且胸围、腹围等体尺参数可用于生猪的繁殖性能估测，也是预测生猪体质量的一项重要指标^[5]。腹围、胸围体尺参数的获取一般是将生猪的侧视点云、俯视点云进行点云配准，得到生猪的 3/4 点云，然后选取猪的镜像对称轴将 3/4 点云进行镜像处理，得到完整的生猪点云，然后提取体测点，再通过曲线拟合的方式测得。

通过本文点云补全方法对侧视点云补全，采用

SAC-IA(采样一致性)粗配准+ICP(迭代最近点)精配准算法分别对补全前后的侧视与俯视点云进行配准。

SAC-IA 粗配准算法依赖于特征点直方图,在算法执行之前先计算点云的 FPFH(快速点特征直方图描述子),首先从待配准点云 P 中选取 n 个采样点,在目标点云 Q 中查找与点云 P 中采样点具有相似 FPFH 的特征点,然后计算对应点之间的刚体变化矩阵^[22]。

ICP 精配准算法将粗配准后的两片点云 P' (经

坐标变换后的源点云)和 Q 作为精配准的初始点集,对源点云 P' 中的每一点 p_i ,在目标点云中寻找距离最近的对应点 q_i ,计算旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 使对应点集之间的均方误差最小,设定最小误差阈值 ε 和最大迭代次数 $N_{\max}$,将得到的旋转平移矩阵作用于源点云 P' ,得到新点云 P'' ,计算 P'' 和 Q 的均方误差,如果两次迭代的误差小于阈值 ε 或当前迭代次数大于 $N_{\max}$,则迭代结束^[23-24]。

补全前后的侧视点云与俯视点云的配准效果如图 6 所示。

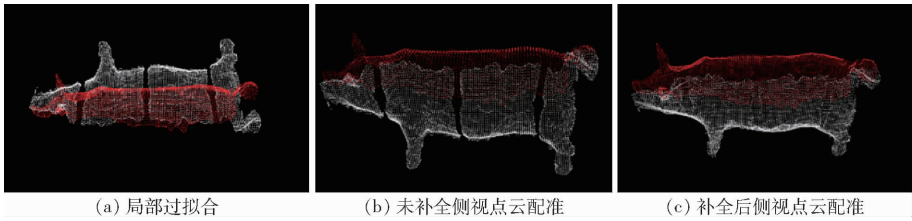


图 6 点云配准

Fig. 6 Point cloud registration

由于点云配准过程中需要对俯视点云、侧视点云公共视野区域进行裁剪,而在侧视点云存在缺失的情况下裁剪区域内对应点对数量较少,且每个视角点云之间的 FPFH 差异较小,导致点云配准时容易出现局部过拟合的现象,如图 6a 所示。

为了减少点云配准时过拟合现象的发生,减少配准时间,本文在配准前分别对侧视点云、俯视点云进行姿态归一化处理。首先确定点云的重心作为坐标轴的中心,再通过 PCA(主成分分析)方法得到点云的坐标轴,但坐标轴的方向难以确定,本文用侧视点云耳尖点来进一步调整坐标轴的方向,用俯视点云右侧耳尖点调整俯视坐标轴方向。侧视点云坐标系调整后如图 7f 所示,俯视点云坐标系调整后如图 7e 所示。

利用均方误差(RMSE)来定量评估点云配准后

的配准误差^[25],而点云的补全效果可以通过配准误差来反映,所以本文直接引用 RMSE 来评价点云的补全效果。RMSE 计算配准过程中对应点对之间的平均欧氏距离, RMSE 越小,表明配准误差越小,配准效果越好。理想情况下,当点云完全配准时,对应点对之间的平均欧氏距离为 0。

由表 1 可以看出,点云补全前后配准的 X 轴 RMSE、 Y 轴 RMSE、 Z 轴 RMSE 以及整体 RSME 变化较小,表明本文提出的点云补全方法拟合出的新点云与俯视点云存在着对应关系,且该对应关系与原始侧视点云与俯视点云之间的对应关系相似;补全后的 RSME 稍有降低,表明该补全方法保留了原始点云的重要特征,为点云的配准提供了新的对应点;腹部补全后距离最大值由 1.54 cm 升至 1.80 cm,因为本文提出的点云补全方法是利用侧视点云的信

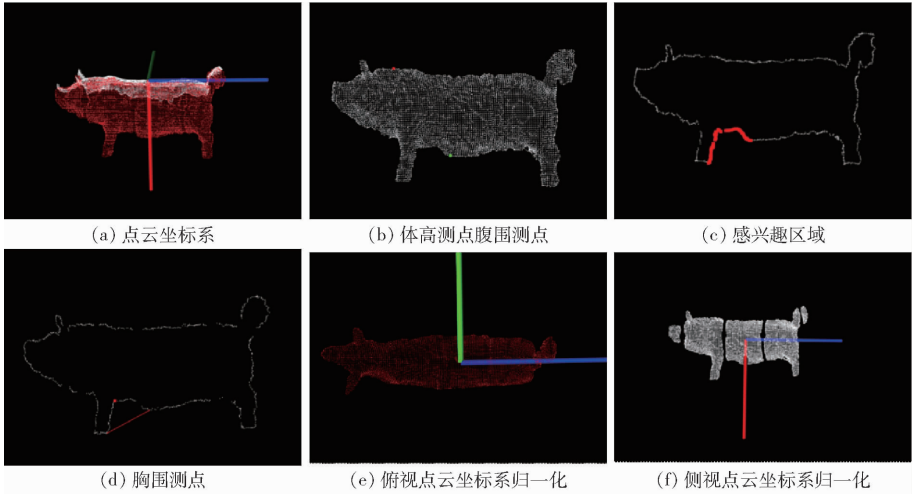


图 7 体尺测点的提取

Fig. 7 Extraction of body measurement points

息拟合出的新点云,新点云与俯视对应点云之间可能存在着较大误差,但总体来看本文的点云补全方法降低了点云配准后整体的均方根误差,提高了点云的配准精度。

表 1 点云补全前后配准的 RMSE

Tab.1 RMSE of registration before and after point cloud completion

项目	cloud completion				cm	
	X 轴 RMSE	Y 轴 RMSE	Z 轴 RMSE	整体 RMSE	距离 最大值	距离 最小值
胸部遮挡	0.37	0.39	0.32	0.63	2.05	0.055
胸部补全	0.38	0.38	0.31	0.62	1.95	0.117
腹部遮挡	0.37	0.39	0.30	0.62	1.54	0.070
腹部补全	0.35	0.38	0.31	0.60	1.80	0.090
其他部位遮挡	0.43	0.39	0.32	0.66	1.73	0.036
其他部位遮挡补全	0.37	0.36	0.29	0.59	1.60	0.084
点云遮挡	0.39	0.39	0.31	0.64	1.77	0.053
点云补全	0.37	0.37	0.30	0.60	1.78	0.097

2.2 生猪侧视点云体尺测点提取试验

2.2.1 人工提取

生猪侧视点云的体测点主要指胸围测点、腹围测点、体高测点等。

在传统的人工测量生猪体尺时,体高通常指自髻甲最高点至地面的垂直距离,通常将背部最高点作为体高测点,胸围通常指沿肩胛后缘绕胸一周的周径,但因其背部特征不明显,人工测量时通常选取前肢腋部高度极小值作为胸围测量点^[26],腹围一般指用软尺在腹部最大的地方紧贴

皮肤绕腹部一周的长度^[4],通常将腹部最低点作为腹围测点。

2.2.2 自动提取

根据人工测量时体尺测点的选取方式,对侧视点云进行体尺测点的自动提取。选取背部最高点作为体高测量点、选取腹部最低点作为腹围测量点、选取前肢腋部高度极小值作为胸围测量点。本文的标准坐标系如图 7a 所示(红色为 X 轴,蓝色为 Z 轴,绿色为 Y 轴)。图 7b 中红色点为体高测点,绿色点为腹围测点,图 7d 中红色点为胸围测点。

胸围测点的提取方法:①将侧视点云投影到 XOZ 平面上。②对侧视点云进行裁剪,选取猪脚到腹围测点之间的区域为感兴趣区域,如图 7c 所示。③求取感兴趣区域的 Z 轴最大值点、X 轴最大值点,过两点做一条直线。④求两点之间距离直线欧氏距离最大的点即为胸围测点,如图 7d 所示。

2.2.3 体尺测点误差分析

选用点云处理软件 CloudCompare 对侧视点云进行体尺点的人工提取,对于每个体尺测点人工标记 3 次求其平均值作为真实值,并与上文方法提取到的体尺测点进行对比分析。由于体高的精确度主要由测量点的 X 轴数据决定,选用 X 轴方向的差值来表示体高测点提取的绝对误差,胸围测点、腹围测点用 Z 轴方向上的误差来表示其测点提取的绝对误差。表 2~4 为腹部、胸部、其他部位补全前后体尺测点自动提取的坐标与真实坐标的对比。

表 2 腹部遮挡补全前后自动提取的体测点与人工提取体测点结果对比

Tab.2 Comparison of results of automatically extracted body measurement points before and after abdomen occlusion complementation and artificially extracted body measurement points

cm			
测点	测量点坐标	真实坐标	绝对误差
未补全体高	(-3.53, -5.79, -37.31)	(-3.42, -6.27, -36.46)	0.11
未补全胸围	(39.38,0, -24.26)	(39.82, -20.65, -24.12)	0.14
未补全腹围	(45.50, -15.28,0.24)	(45.12, -14.33, -1.30)	1.54
补全后体高	(-3.38, -5.86, -30.76)	(-3.25, -6.48, -31.72)	0.13
补全后胸围	(39.36,0, -24.33)	(39.70, -20.67, -24.21)	0.12
补全后腹围	(45.25, -15.16,0.15)	(45.23, -15.94,0.79)	0.64

表 3 胸部遮挡补全前后自动提取的体测点与人工提取体测点结果对比

Tab.3 Comparison of results of automatically extracted body measurement points before and after chest occlusion complementation and artificially extracted body measurement points

cm			
测点	测量点坐标	真实坐标	绝对误差
未补全体高	(-3.41, -5.55, -31.51)	(-3.05, -5.58, -33.32)	0.36
未补全胸围	(35.80,0, -21.04)	(39.80, -21.04, -24.45)	3.41
未补全腹围	(45.71, -14.44, -2.51)	(45.32, -15.49, -2.19)	0.32
补全后体高	(-3.81, -5.60, -30.94)	(-3.64, -5.52, -38.01)	0.17
补全后胸围	(38.72,0, -22.77)	(38.81, -17.00, -21.88)	0.89
补全后腹围	(45.26, -12.65, -3.56)	(45.42, -12.98, -3.79)	0.23

表 4 其他部位遮挡补全前后自动提取的体测点与人工提取体测点结果对比

Tab.4 Comparison of results of automatically extracted body measurement points before and after occlusion completion of other parts and manually extracted body measurement points

测点	测量点坐标	真实坐标	绝对误差
未补全体高	(- 3. 93, - 5. 29, - 34. 87)	(- 3. 77, - 5. 84, - 39. 88)	0. 16
未补全胸围	(38. 90, 0, - 22. 38)	(39. 17, - 16. 49, - 21. 06)	1. 32
未补全腹围	(44. 97, - 14. 98, - 2. 19)	(44. 96, - 13. 22, - 2. 76)	0. 57
补全后体高	(- 5. 28, - 8. 86, - 31. 45)	(- 4. 36, - 5. 50, - 35. 89)	0. 93
补全后胸围	(38. 22, 0, - 24. 61)	(38. 49, - 19. 08, - 24. 69)	0. 08
补全后腹围	(44. 85, - 13. 69, - 4. 84)	(44. 84, - 14. 90, - 5. 74)	0. 90

腹部遮挡的侧视点云补全,对体高测点、胸围测点的提取影响较小,因为腹部遮挡状态下,体高测点以及胸围测点并未被遮挡,体尺测点自动提取算法提取的体高测点、胸围测点不受影响,误差无明显变化;腹围测点的提取误差降低 0.9 cm,主要因为腹部遮挡时,体尺测点自动提取算法无法提取腹围测点的真实值,算法自动选取腹部其他位置最低点作为腹围测点,导致体尺测点的提取误差较大;利用本文算法对腹围进行补全后,算法自动提取补全后的腹围测点,降低了腹围测点的提取误差。胸部遮挡的侧视点云补全,对体高测点、腹围测点的提取影响较小,胸围测点的提取误差降低 2.52 cm。其他部位遮挡的侧视点云补全,对体高测点、腹围测点的提取影响较小;胸围测点的提取误差降低 1.24 cm,因为此侧视点云的缺失位置在胸围附近;体高测点的提取误差由 0.16 cm 上升至 0.93 cm,误差增加是因为体高测点附近存在点云缺失,深度相机无法精确地获取物体边缘信息,且本文算法是利用侧视点云边缘信息通过曲线拟合的方式实现边缘点云的约束,所以体高测点的提取误差可能增加。

目前国内外针对牲畜点云补全算法的研究较少,有学者提出了一种基于视频错帧的点云补全方

法,实现了牲畜侧视点云的补全,点云补全成功率为 98.84%,点云补全后胸围测点提取绝对误差为 0 ~ 2.80 cm^[18]。本文方法对生猪侧视点云补全后,胸围测点提取绝对误差为 0 ~ 1 cm,满足养殖场精度要求,并且有一定提高。经过对试验数据与结果的分析讨论,运用本文方法对侧视点云补全后,提取体尺测点仍然存在误差,主要原因有:消费级 DK 深度相机无法精确获取物体边缘信息。用体素网格方法对侧视点云下采样时未保留点云的重要特征点。本文的点云补全方法是通过缺失点云附近的点云信息拟合出的新点云,拟合方法存在一定误差。

3 结束语

基于阈值分析的三次 B 样条曲线拟合和边缘检测相结合的方法实现了生猪侧视点云的补全。试验表明,该方法对侧视点云补全后,降低了点云配准的 RMSE,提高了点云配准的精度;侧视点云补全后,体高测点、胸围测点和腹围测点的提取误差均在 1 cm 以内,;对腹部缺失点云补全后,腹围测点提取的绝对误差由 1.54 cm 降至 0.64 cm,对胸部缺失点云补全后,胸围测点的提取误差由 3.41 cm 降至 0.89 cm。

参 考 文 献

[1] GUO Hao, LI Zhenbo, MA Qin, et al. A bilateral symmetry based pose normalization framework applied to livestock body measurement in point clouds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 160: 59 – 70.

[2] 郭浩. 动物体表三维数据获取与处理算法研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.

GUO Hao. Study on 3D data capturing and processing method for live animal[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[3] 尹令,蔡更元,田绪红,等. 多视角深度相机的猪体三维点云重构及体尺测量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 201 – 208.

YIN Ling, CAI Gengyuan, TIAN Xuhong, et al. Three dimensional point cloud reconstruction and body size measurement of pigs based on multi-view depth camera[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 201 – 208. (in Chinese)

[4] 李卓,杜晓冬,毛涛,等. 基于深度图像的猪体尺检测系统[J]. 农业机械学报,2016,47(3): 311 – 318.

LI Zhuo, DU Xiaodong, MAO Tao, et al. Pig dimension detection system based on depth image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 311 – 318. (in Chinese)

[5] 王可,郭浩,马钦,等. 基于单视角点云镜像的猪只体尺测量方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 187 – 195.

WANG Ke, GUO Hao, MA Qin, et al. Pig body size measurement method based on mirror reflection of single angle point cloud [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 187 – 195. (in Chinese)

[6] 司永胜,安露露,刘刚,等. 基于 Kinect 相机的猪体理想姿态检测与体尺测量[J]. 农业机械学报,2019, 50(1): 58 – 65.

- SI Yongsheng, AN Lulu, LIU Gang, et al. Ideal posture detection and body size measurement of pigs based on Kinect camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 58–65. (in Chinese)
- [7] 郭浩, 张胜利, 马钦, 等. 基于点云采集设备的奶牛体尺指标测量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 116–122.
- GUO Hao, ZHANG Shengli, MA Qin, et al. Cow body measurement based on Xtion [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 116–122. (in Chinese)
- [8] 张馨月, 刘刚, 经玲, 等. 基于点云精简的奶牛背部体尺测点自动提取方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 267–275.
- ZHANG Xinyue, LIU Gang, JING Ling, et al. Automatic extraction method of cow's back body measuring point based on simplification point cloud [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 267–275. (in Chinese)
- [9] 安露露. 基于机器视觉的猪体尺测量及行为识别研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- AN Lulu. Research on pig body measurement and behavior recognition based on machine vision [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [10] 刘同海, 藤光辉, 付为森, 等. 基于机器视觉的猪体尺测点提取算法与应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 161–168.
- LIU Tonghai, TENG Guanghui, FU Weisen, et al. Extraction algorithms and applications of pig body size measurement points based on computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 161–168. (in Chinese)
- [11] 郭浩, 马钦, 张胜利, 等. 基于三维重建的动物体尺获取原型系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 227–232, 246.
- GUO Hao, MA Qin, ZHANG Shengli, et al. Prototype system of shape measurements of animal based on 3D reconstruction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 227–232, 246. (in Chinese)
- [12] 陈相, 童小华. 基于三角格网的点云空洞修补算法及精度研究[J]. 测绘通报, 2013(4): 1–3.
- CEHN Xiang, TONG Xiaohua. Research on points cloud hole filling algorithm and accuracy in triangle mesh [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(4): 1–3. (in Chinese)
- [13] WANG Jianing, MANUEL M, OLIVEIRA. Filling holes on locally smooth surfaces reconstructed from point clouds [J]. Image and Vision Computing, 2005, 25(1): 103–113.
- [14] MAHDAOUI A, SBAI E. 3D point cloud simplification based on the clustering algorithm and introducing the Shannon's entropy [C]//Thirteenth International Conference on Machine Vision, 2021.
- [15] QUINSAT Y, LARTIGUE C. Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1–4): 411–421.
- [16] 王凡. 基于机器学习的点云孔洞修补算法的并行化研究[D]. 西宁: 宁夏大学, 2016.
- WANG Fan. Parallel research on point cloud hole filling algorithm based on machine learning [D]. Xining: Ningxia University, 2016. (in Chinese)
- [17] 岳杰. 植物三维点云修补方法研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
- [18] 初梦苑. 基于三维重建的奶牛体尺检测与体重预估研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- CHU Mengyuan. Research on body measurement and weight estimation of cows based on 3D reconstruction [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [19] 牛金玉. 基于三维点云的奶牛体尺测量与体重预测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- NIU Jinyu. Body size measurement and weight prediction for dairy cows based on 3D point cloud [D]. Yangling: Shannxi Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [20] 海啸, 朱志杰. 最小二乘法和三次样条曲线拟合的比色测温误差修正对比分析[J]. 激光杂志, 2015, 36(6): 72–76.
- HAI Xiao, ZHU Zhijie. The comparison between the least square method and cubic spline interpolation in errors of colorimetry temperature measurement [J]. Laser Journal, 2015, 36(6): 72–76. (in Chinese)
- [21] 段振云, 王宁, 杨旭, 等. 一种改进 B 样条曲线拟合算法研究[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 17–19, 23.
- DUAN Zhenyun, WANG Ning, YANG Xu, et al. An algorithm of improved B-spline curve fitting [J]. Mechanical Design and Manufacture, 2016(5): 17–19, 23. (in Chinese)
- [22] 郭思猛. 三维点云的特征点提取与配准技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- GUO Simeng. Research on feature point extraction and registration technology of 3D point cloud [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 李为民, 刘超. 基于 PCA 的 ICP 点云配准算法的改进研究[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(6): 11–13.
- LI Weimin, LIU Chao. Research on improved PCA-based ICP point cloud registration algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(6): 11–13. (in Chinese)
- [24] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698–700.
- [25] 崔志婷, 李彩林, 王志勇, 等. 激光点云粗配准方法实验对比与分析[J]. 北京测绘, 2021, 35(3): 404–407.
- CUI Zhiting, LI Cailin, WANG Zhiyong, et al. Experimental comparison and analysis of laser point cloud coarse registration methods [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2021, 35(3): 404–407. (in Chinese)
- [26] ZHANG X, LIU G, JING L, et al. Automated measurement of heart girth for pigs using two kinect depth sensors [J]. Sensors, 2020, 20(14): 3848.