

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.045

# 基于三维重建的奶牛体重预估方法

初梦苑<sup>1</sup> 刘刚<sup>2</sup> 司永胜<sup>1</sup> 冯凡<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001;

2. 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)

**摘要:** 为提高奶牛称量的工作效率,降低劳动强度,提出一种基于三维重建的奶牛体重预估方法。首先搭建奶牛深度视频获取平台,利用 Kinect 相机分别采集奶牛俯视与侧视视角数据,选取深度视频中同步的俯视帧与侧视帧并转换为点云,去除复杂背景提取奶牛点云;然后利用一帧不同步的侧视点云将同步侧视点云中缺失区域补全,配准俯视与侧视点云后,基于俯视点云中奶牛脊柱的位置选取对称面,利用单视角侧视点云获取得到双视角点云,完成奶牛体表点云的重建;最后进行点云曲面重建,利用曲面模型的体积与表面积建立奶牛体重预估模型。利用 29 头奶牛数据验证模型效果,结果表明,奶牛曲面模型整体表面积、去除四肢及头部的体积与体重呈显著正相关,体重预估绝对误差在  $-18.67 \sim 23.34$  kg 之间,相对误差均小于 3.40%,平均相对误差为 2.04%。

**关键词:** 奶牛; Kinect 相机; 点云补全; 镜像对称; 三维重建; 体重预估

**中图分类号:** TP391.41      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0378-07

## Predicting Method of Dairy Cow Weight Based on Three-dimensional Reconstruction

CHU Mengyuan<sup>1</sup> LIU Gang<sup>2</sup> SI Yongsheng<sup>1</sup> FENG Fan<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to complement the missing point cloud and improve the selection of single-view mirror symmetry planes, and solve the problem of low parameter dimensions in the existing cow weight estimation model, a method of dairy cow weight estimation based on 3D reconstruction was proposed. Firstly, a cow depth video acquisition platform was built, and the cow's top and side perspective data were collected by using the Kinect camera. After selecting the synchronized top and side view frames in the depth video, they were converted to point clouds, and the complex background was removed to extract the cow points cloud. Then it was proposed to use the side view point cloud of different frames to complete the missing part of the selected side view point cloud, and after registering the top view and side view point clouds, for the single view side view point cloud, a method was proposed to select the symmetry plane based on the position of the cow spine in the overlook point cloud, so the dual-view side-view point cloud was obtained, and the reconstruction of the point cloud on the surface of the cow was completed. Finally, point cloud surface reconstruction was carried out, and the volume and surface area of the surface model were used to establish a cow weight estimation model. The data of 29 cows were used to verify the model, and the results showed that the surface area of the cow's curved model, the volume of the curved model, excluding the limbs and head, and body weight were significantly positively correlated. The absolute error of weight estimation was between  $-18.67$  kg and  $23.34$  kg, the relative error was less than 3.40%, and the average relative error was 2.04%.

**Key words:** cows; Kinect camera; point cloud completion; mirror symmetry; 3D reconstruction; weight estimation

收稿日期: 2020-08-09 修回日期: 2020-09-10

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFD05007050)、河北农业大学精准畜牧学科群建设项目(1090064)和河北农业大学理工基金项目(ZD201702)

**作者简介:** 初梦苑(1996—),女,硕士生,主要从事基于机器视觉的健康养殖应用研究,E-mail: 506852649@qq.com

**通信作者:** 司永胜(1973—),男,副教授,博士,主要从事农业领域机器视觉应用及无损检测研究,E-mail: siyongsheng@foxmail.com

## 0 引言

奶牛体重的测量在奶牛饲养繁殖中占据重要地位。奶牛体重不仅是衡量牛体生长发育的重要指标,也是测定其生产性能、育肥观测、疫病判断、日增重、产奶量等的主要依据<sup>[1-5]</sup>。目前国内养殖场多采用体重秤测量奶牛体重,该方法费时费力,易使奶牛产生应激反应,降低产奶量,测量精度也难以控制<sup>[6]</sup>。

随着机器视觉技术的发展,在利用机器视觉技术预估家畜体重方面,国内外已取得较多研究成果<sup>[7-10]</sup>。杨艳等<sup>[11]</sup>计算种猪投影面积和体尺,分析与体重的相关性。武尧等<sup>[8]</sup>利用母猪图像建立评估模型,估测母猪体重。何东健等<sup>[12]</sup>使用 Kinect 获取奶牛点云数据,点云预处理、修复后,利用提取的体尺构建奶牛体重预测模型。SCHOFIELD 等<sup>[13]</sup>利用背部投影面积预估猪只体重。TASDEMIR 等<sup>[14]</sup>在奶牛背部和侧面两方向获取三维点云后计算出奶牛体尺,根据体尺及回归方程预估奶牛体重。JØRGEN<sup>[15]</sup>利用 Kinect 相机采集的红外深度图像估算 2 个品种猪只的重量。

上述研究多利用图像或点云计算体尺、投影面积等低维参数建立预估模型<sup>[16]</sup>,奶牛的体重和体积、表面积高度相关。本文提出一种基于三维重建的奶牛体重预估方法。先将侧视点云补全,然后拼接俯侧两视角点云,并镜像对称侧视点云,最后对整体点云曲面重建,利用曲面模型体积与表面积预估奶牛体重。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据采集

试验数据采集自河北省保定市满城宏达牧业有限公司奶牛养殖场。如图 1 所示,数据采集通道底部设有秤,测量奶牛体重。通道宽度 1.2 m,略宽于奶牛体宽,保证单只奶牛单向通过采集通道,当奶牛进入通道后,关闭通道前后挡板,称量奶牛体重。通道上方和侧方各安装一台 Kinect 相机(美国微软公司)。上方 Kinect 相机镜头与地面平行,距离地面 3.18 m。侧方 Kinect 相机镜头与地面垂直,距离地面约 1.04 m,距离通道围栏约 3.5 m。视频的分辨率为 512 像素 × 424 像素,帧率为 30 f/s。共采集 86 头奶牛的俯视与侧视视频,每头奶牛选取 2 帧俯视图像,3 帧侧视图像。本文数据的处理与分析使用软件 Matlab 2017a(美国 MathWorks 公司)。

### 1.2 奶牛点云提取

首先将选取的图像根据深度信息转换为点云。

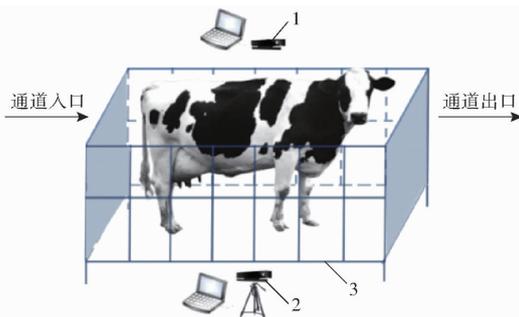


图 1 奶牛数据获取平台

Fig. 1 Platform for cow data acquisition

1、2. Kinect 相机 3. 体重秤

原始点云包含奶牛、地面、采集通道、养殖场设备等,如图 2a、2b 所示。将通道内的区域作为兴趣区,提取兴趣区内的点云。采用聚类分割方法,选取点云中点数最多的一簇为目标点云<sup>[17]</sup>。去除目标点云中的离群点,得到最终的奶牛目标点云,如图 2c、2d 所示。

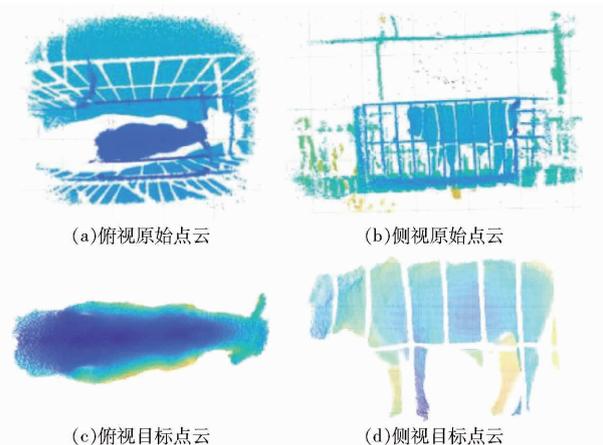


图 2 奶牛点云提取

Fig. 2 Cow point cloud extraction

### 1.3 奶牛点云三维重建

#### 1.3.1 侧视点云补全

奶牛侧视点云因围栏遮挡而缺失部分点云,尤其是奶牛的躯干部位遮挡严重。点云的缺失会影响三维重建效果,需要将侧视点云中躯干缺失区域补全。点云补全方面的相关研究已取得较大进展<sup>[18-20]</sup>,但运动家畜点云的补全研究较少。由于奶牛在通道内有小范围的运动,因此,躯干被遮挡的部位在视频的其它图像帧中会显现。本文提出了基于视频的错帧补全方法补全侧视点云中躯干缺失区域。

人工选取奶牛视频中两帧侧视图像,一帧为待补全图像,另一帧为侧补图像。两帧图像中的奶牛躯干应尽量呈笔直状,侧补图像中的奶牛位置与待补全的图像帧中位置在水平方向上应略有差异。然后分别提取两帧图像的奶牛点云,提取出的点云以

下简称待补点云和侧补点云,如图3所示。

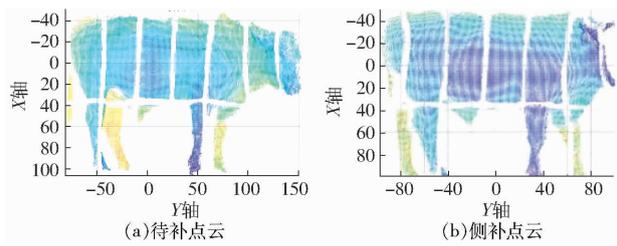


图3 奶牛侧视点云

Fig. 3 Cow's side view point clouds

然后利用迭代最近点算法 (Iterative closest point, ICP) 将两帧侧视点云拼接配准,可以补全侧视点云中缺失区域。但 ICP 算法要求两帧点云重合率较高,所以为避免配准陷入上述缺陷导致的局部最优解,达到更好的配准效果,本文去除奶牛头部、四肢,对侧视点云中躯干部位进行配准。

截取奶牛躯干需要检测躯干与四肢、躯干与头部的分割线,分别记为  $x = X$ ,  $y = Y$ ,本文采用基于点云切片的投影法检测分割线位置,具体为:

$XOY$  视图下的侧视点云沿  $X$  轴横向切分为多个点云切片,投影每个切片的点数目,如图4a中红色曲线所示,本研究中,恰好在躯干与四肢的连接处有栏杆遮挡,造成投影极小值。但即使没有栏杆遮挡,可以看出,躯干与四肢的投影区别也较大,依然可以使用该方法检测躯干与四肢的分割线。同理,沿  $Y$  轴纵向切分可以得到侧视点云在  $Y$  轴上的投影曲线,如图4b中红色曲线所示,奶牛的两个前腿分别对应2个投影极大值,2个极大值中心至牛头最前端距离的  $3/5$  (由牛头部计算) 作为奶牛头部与躯干分割阈值。

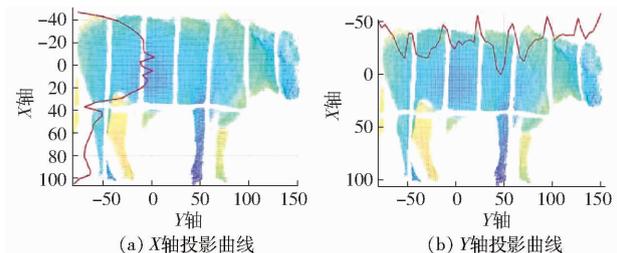


图4 投影曲线

Fig. 4 Projection curves

在补全操作之前,先检测出缺失区域,只对该区域进行补全。由于奶牛躯干中缺失区域多级通道纵向栏杆所遮挡,所以缺失区域在  $Y$  轴方向上点数目相比于其他区域应较少。于是本文检测缺失区域的方法为:待补点云躯干沿  $Y$  轴切分为  $n$  个小切片点云,计算  $n$  个切片中点的数目  $C_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),以  $n$  个切片的序号为横坐标,点数  $C_i$  为纵坐标,得到点云在  $Y$  轴方向上点数目统计图,如图5所示。

结合采集通道纵向相邻的两栏杆之间距离,计

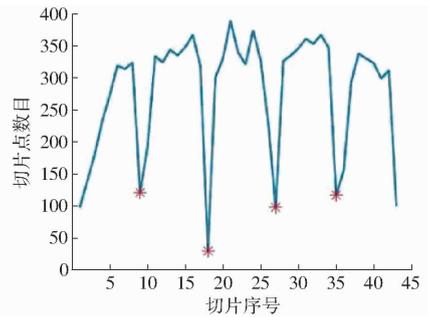


图5 切片点云中点数目统计结果

Fig. 5 Statistics of number of points in sliced point cloud

算得到若干个极小值点,即为躯干点云缺失处,图5中用红星标出。将统计图中的极小值点映射到待补点云  $Y$  轴中,计算公式为

$$b = b_{\min} + \frac{b_{\max} - b_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} (a - a_{\min}) \quad (1)$$

式中  $a$ ——需要映射的点值

$b$ ——映射到目标区间后的点值

$a_{\min}$ ——目前区间的左端点值

$a_{\max}$ ——目前区间的右端点值

$b_{\min}$ ——目标区间的左端点值

$b_{\max}$ ——目标区间的右端点值

假设映射得到点云中某缺失处  $Y = P$ ,再将缺失点左右各扩展适当距离为缺失区域,本文将区间  $[P-4, P+7]$  定为缺失区域,待补点云躯干中所有缺失区域利用侧补点云相应位置替换,即可得到补全后的侧视点云。

### 1.3.2 侧视点云镜像对称

将俯视点云与补全后的待补点云拼接配准后,可得到奶牛的部分体表点云<sup>[21]</sup>,如图6所示。但奶牛另一侧点云数据缺失较大,于是本文采取单视角侧视点云镜像对称的方法,得到双视角侧视点云<sup>[22]</sup>,并提出一种基于奶牛脊柱的对称平面选取方法。

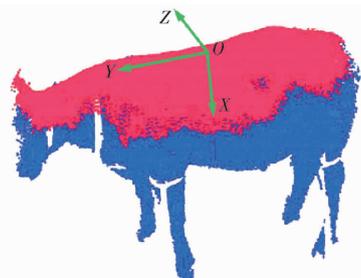


图6 俯侧点云配准

Fig. 6 Top and side view point cloud registration

对称平面应与  $YOZ$  面垂直。此外,该对称平面应通过奶牛背部脊柱,可恰当地将俯视点云分为两部分,所以在红色俯视点云中,找到奶牛背部脊柱上两点即可,然后过此两点做垂直平面  $YOZ$  的平面,

即求得对称平面。

对称平面的选取关键在于点  $D_1$ 、 $D_2$  位置的选取。确定平面的两点距离不宜太近, 否则效果较差, 同时, 所选两点应在奶牛躯干内。奶牛脊柱上的点在  $X$  轴方向上高于背部其它位置的点, 按如下方法进行两点的选取: 将俯视点云均匀分为左、中、右 3 部分, 如图 7 所示, 分别在左侧点云  $A_2$  和右侧点云  $A_1$  中找  $X$  坐标最小的点, 这 2 个点即为  $D_1$ 、 $D_2$ 。

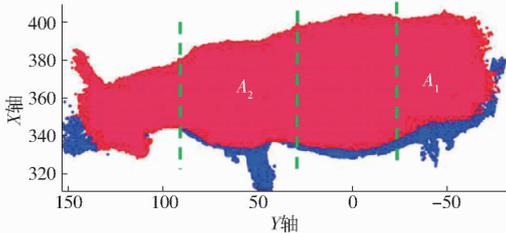


图 7  $D_1$ 、 $D_2$  选取范围

Fig. 7  $D_1$  and  $D_2$  selection range

得到  $D_1$ 、 $D_2$  的坐标为  $(X_{d1}, Y_{d1}, Z_{d1})$  和  $(X_{d2}, Y_{d2}, Z_{d2})$ , 且对称平面垂直于  $YOZ$  平面, 计算可得到对称平面方程为

$$z = N - My \quad (2)$$

其中

$$M = \frac{Z_{d1} - Z_{d2}}{Y_{d2} - Y_{d1}} \quad (3)$$

$$N = MY_{d1} + Z_{d1} \quad (4)$$

对称平面可视化如图 8 所示。

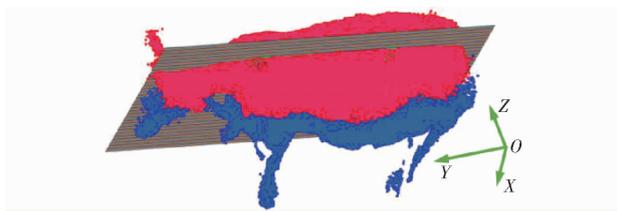


图 8 对称平面可视化图

Fig. 8 Symmetry plane visualization

然后将侧视点云中满足

$$z_0 < N - My_0 \quad (5)$$

的点做关于对称平面的镜像对称操作。设点  $(x_0, y_0, z_0)$  符合对称操作条件, 其对称点的坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 计算得到

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \\ z_1 = \frac{2N + M^2 z_0 - 2y_0}{1 + M^2} \\ y_1 = M(z_1 - z_0) + y_0 \end{cases} \quad (6)$$

由此获得双视角侧视点云, 奶牛体表点云的三维重建完成, 如图 9 所示, 其中绿色点云由蓝色侧视点云镜像对称得到。

#### 1.4 奶牛模型的标定

为验证所建立的三维模型的精度, 利用奶牛模型进行标定分析。奶牛模型尺寸接近实际奶牛尺

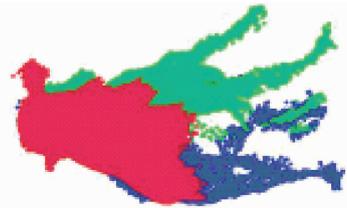


图 9 点云镜像对称图

Fig. 9 Point cloud mirror symmetry

寸, 体直长约 1.62 m (奶牛肩端点到坐骨结节点的水平距离), 体高约 1.36 m (奶牛耆甲最高点到地面的垂直距离), 腹宽约 0.73 m (奶牛腹部的最大宽度)<sup>[6]</sup>。首先将奶牛模型放置在不遮挡的理想环境中, 进行多视角深度图像采集, 经过点云拼接配准后, 对奶牛模型进行三维重建, 并提取体直长、体高、腹宽。然后将奶牛模型放置在有遮挡的采集通道内, 利用本文点云补全和镜像对称的方法进行三维重建, 提取体直长、体高和腹宽。对比两种情况下的体尺检测结果, 将无遮挡情况下的体尺数据作为真实值, 有遮挡情况下三维重建后所提取的体尺误差小于 1%。

#### 1.5 奶牛体重预估

##### 1.5.1 奶牛曲面重建

进行三维点云重建后, 利用三维重建的点云进行奶牛体重预估。首先将体表点云进行基于点云包裹的曲面重建, 然后通过曲面模型的体积及表面积预估体重。

利用 Alpha Shapes 算法<sup>[23]</sup> 从奶牛三维点云中提取边缘, 构建三维点云的包裹多面体, 得到奶牛点云的轮廓包裹。填充包裹空洞、删除较小区域后, 最大的包裹即为奶牛曲面模型, 如图 10 所示。

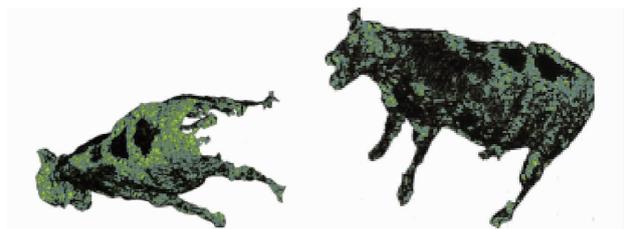


图 10 奶牛曲面重建模型

Fig. 10 Cow surface reconstruction

##### 1.5.2 奶牛体重预估方法

计算图 10 曲面包络体的体积与表面积, 以此预估奶牛体重。进行奶牛的三维重建时, 由于相机角度和相机数量的限制, 奶牛的四肢和头部三维重建效果稍有不足, 本文参照文献[24-26]的方法, 进行了去除奶牛点云中四肢部分、去除四肢和头部以及完整奶牛 3 种情况的三维重建。然后计算其体积、表面积与体重的相关系数, 并相应的建立体重预估模型。

## 2 结果与分析

试验共采集 86 头奶牛的俯视与侧视数据,每头奶牛选取俯视图 2 帧、与俯视图同步的侧视图 2 帧,另外选取 1 帧侧补点云,即每头奶牛选取 5 帧图像,共计 430 帧。点云预处理后,利用本文方法进行奶牛三维重建,建立体重预估模型。

### 2.1 侧视点云补全分析

根据本文分割奶牛躯干的方法截取两个侧视点云的躯干点云,如图 11 所示。

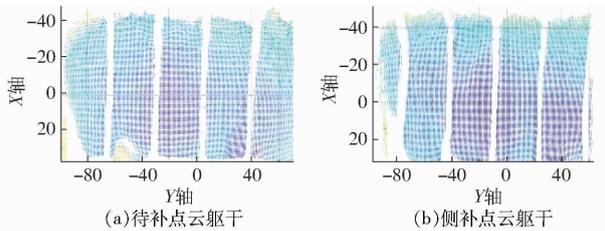


图 11 奶牛躯干截取图

Fig. 11 Cow trunk interception diagrams

两个躯干点云的配准效果如图 12 所示,其中蓝色点云取自待补点云躯干,红色点云取自侧补点云

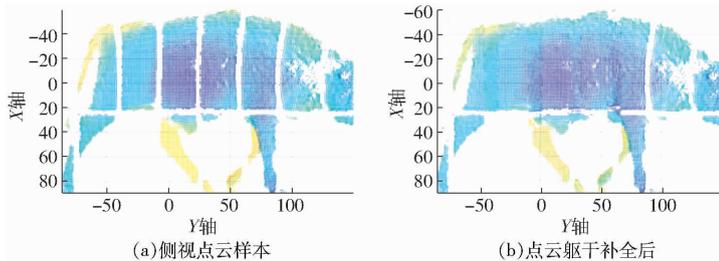


图 13 点云补全后样本效果图

Fig. 13 Side view point cloud completion sample results

### 2.2 侧视点云镜像对称分析

图 14 为 2 头奶牛的单视角侧视点云镜像对称结果,其中红色点云为俯视点云,蓝色点云为侧视点云,绿色点云为镜像对称操作所得到的侧视点云。本文基于奶牛背部脊柱自动选取对称平面,得到双视角侧视点云。测试 172 组点云,采用本文方法获取奶牛双视角侧视点云平均用时 0.072 6 s,算法耗时较少。侧视点云镜像对称的成功率为 93.02%。采用本文算法要求目标点云去除离群点、噪声点等,否则基于背部脊柱的选点容易出错,影响镜像对称效果,如图 14b 所示。

### 2.3 体重预估模型分析

三维重建后,计算每头奶牛在 3 种情况下三维重建牛体的体积与表面积。然后在 86 头奶牛的试验样本中,任选出 57 头奶牛作为训练样本,其余作为测试样本。

将 57 个训练样本 3 种情况下的体积、表面积与

躯干。可以观察到,蓝色点云中因围栏遮挡而缺失的区域可由相应位置的红色点云补全。

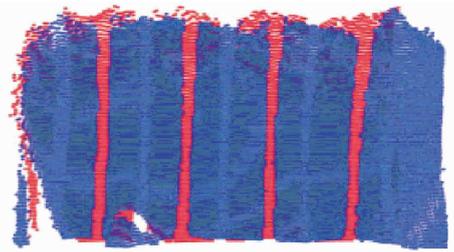


图 12 侧视点云配准效果图

Fig. 12 Side view point cloud registration

图 13 为奶牛的待补点云补全结果。当待补帧与侧补帧中奶牛躯干姿态相似时,借助两帧点云在水平方向上的差异,采用本文方法可以有效检测待补躯干点云中缺失区域,并利用侧补点云补全缺失。共测试 172 个侧视点云,采用本文方法进行点云补全平均用时 2.260 1 s,算法运行耗时较少。补全成功率为 98.84%,失败的原因主要是两侧视帧姿态差异较大,导致补全效果不好。所获取的补全后侧视点云与奶牛的原始形态相似度较高,补全效果局部放大后如图 13c 所示。

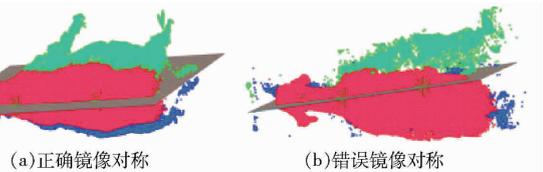
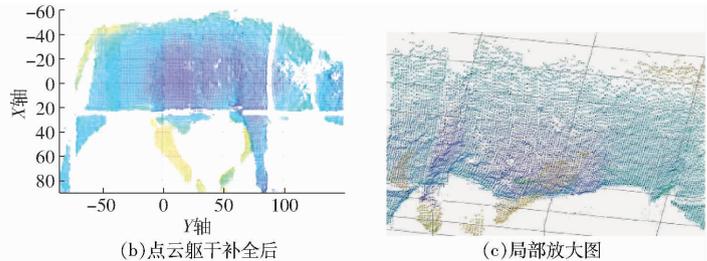


图 14 镜像对称样本效果对比

Fig. 14 Mirror symmetry sample results

奶牛样本实际体重进行线性回归分析。其中去除四肢及头部的曲面模型体积与体重呈明显正相关关系,决定系数为 0.799 4,如图 15a 所示。其中奶牛整体的曲面模型表面积与体重也呈明显正相关关系,决定系数为 0.820 2,如图 15b 所示。

进一步将上述两种相关系数较高的体积、表面积与奶牛体重做二元线性回归分析,得到体重预估模型为

$$w = 0.000 3x_1 + 0.001 4x_2 + 450.168 7 \quad (7)$$

式中  $w$ ——体重预测值

$x_1$ ——曲面模型去除四肢头部的体积

$x_2$ ——曲面模型整体的表面积

利用测试样本的 29 头奶牛验证模型效果。试验结果为, 奶牛预估体重的绝对误差在  $-18.67 \sim$

$23.34 \text{ kg}$  之间, 相对误差均小于  $3.40\%$ , 平均相对误差为  $2.04\%$ , 奶牛实测体重与预估体重的回归直线如图 15c 所示。

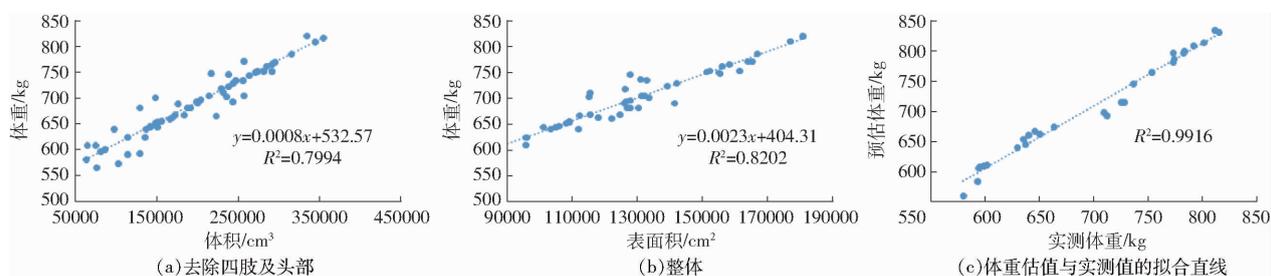


图 15 体重预估模型回归分析

Fig. 15 Regression analysis of weight estimation model

分析误差产生的来源主要有: 奶牛在秤上行走晃动时, 读数产生误差, 即真实值可能具有一定的误差; 目标点云分割不精确, 噪声点影响了奶牛的重建效果, 导致体重预估误差。

本文三维重建算法既可用于奶牛体重预估, 也可进一步用于奶牛体尺测量。

### 3 结论

(1) 将采集到的奶牛深度数据进行了预处理, 完整分割奶牛目标, 去除离群点, 为三维重建奠定了基础。

(2) 提出基于视频的错帧补全方法, 可以有效将侧视点云补全, 整体补全效果良好, 成功率达到

$98.84\%$ 。

(3) 为获取完整的奶牛体表点云, 提出基于奶牛背部脊柱的镜像对称平面选取方法, 该方法可以较稳定地获取奶牛侧视点云镜像, 成功率为  $93.02\%$ 。

(4) 利用本文方法重建奶牛三维点云, 去除四肢及头部的曲面模型体积与体重的决定系数为  $0.7994$ , 模型整体的表面积与体重决定系数为  $0.8202$ 。

(5) 利用相关性较强的模型体积与表面积建立回归模型预估 29 头奶牛体重, 试验结果表明, 奶牛体重预估的绝对误差在  $-18.67 \sim 23.34 \text{ kg}$  范围内, 相对误差均小于  $3.40\%$ , 平均相对误差为  $2.04\%$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 马聪, 张建华, 朱丹. 农场称重系统的发展现状、存在问题及对策分析[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(7): 33-35, 63. MA Cong, ZHANG Jianhua, ZHU Dan. Present situation, problems and countermeasures of weighting system in cattle farm[J]. Ningxia Journal of Agriculture, 2018, 59(7): 33-35, 63. (in Chinese)
- [2] ZANTON G I, HEINRICHS A J. Meta-analysis to assess effect of prepubertal average daily gain of Holstein heifers on first-lactation production [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(11): 3860-3867.
- [3] KEOWN J F, EVERETT R W, EMPET N B, et al. Lactation curves[J]. Journal of Dairy Science, 1986, 69(3): 769-781.
- [4] 徐启明. 不同因素对奶牛产奶量的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(16): 113-114. XU Qiming. Study on the influence of different factors on milk production of dairy cows[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2014, 20(16): 113-114. (in Chinese)
- [5] BRICKELL J S, POLLOTT G E, CLEMPSON A M, et al. Polymorphisms in the bovine leptin gene associated with perinatal mortality in Holstein-Friesian heifers[J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(1): 340-347.
- [6] 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: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [7] PEZZUOLO A, MILANI V, ZHU Dehai, et al. On-barn pig weight estimation based on body measurements by structure-from-motion (SfM) [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(11): 3603.
- [8] 武尧, 刘振宇, 谷亚宁, 等. 基于机器视觉的母猪体重估测[J]. 电子技术与软件工程, 2020(1): 100-101. WU Yao, LIU Zhenyu, GU Yaning, et al. Sow weight estimation based on machine vision[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(1): 100-101. (in Chinese)
- [9] 张立倩. 基于模糊逼近计算视觉算法的奶牛体重测量[J]. 科技通报, 2013, 29(11): 149-152. ZHANG Liqian. The cows weight calculation based on non-measurement machine vision [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(11): 149-152. (in Chinese)
- [10] 郝雪萍. 基于图像处理的杜泊羊体重估算模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015. HAO Xueping. Research on dorper sheep weight estimation model based on image processing [D]. Wuhan: Wuhan University

- of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 杨艳,滕光辉,李保明. 计算机视觉技术在种猪体尺体重估算中的应用[C]//2005年中国农业工程学会学术年会论文集第三分册,2005:399-402.  
YANG Yan, TENG Guanghui, LI Baoming. Determining pig dimensions and weights using computer vision techniques[C]//Volume 3 of the 2005 Annual Conference of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005:399-402. (in Chinese)
- [12] 何东健,牛金玉,张子儒,等. 基于改进三次B样条曲线的奶牛点云缺失区域修复方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6):225-231.  
HE Dongjian, NIU Jinyu, ZHANG Ziru, et al. Repairing method of missing area of dairy cows' point cloud based on improved cubic B-spline curve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):225-231. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180626&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180626&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.026. (in Chinese)
- [13] SCHOFIELD C P, MARCHANT J A, WHITE R P, et al. Monitoring pig growth using a prototype imaging system[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(3):205-210.
- [14] TASDEMIR S, URKMEZ A, INAL S. Determination of body measurements on the Holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 76(2):189-197.
- [15] JØRGEN K. Estimation of pig weight using a Microsoft Kinect prototype imaging system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109:32-35.
- [16] 石晨,滕光辉,张建龙,等. 基于LabVIEW的双目立体视觉系统估测猪体重方法[C]//中国畜牧兽医学会信息技术分会第十二届学术研讨会论文集,2017:146-155.  
SHI Chen, TENG Guanghui, ZHANG Jianlong, et al. Binocular stereo vision system based on LabVIEW to estimate pig weight [C]//Proceedings of the 12th Academic Symposium of Information Technology Branch of Chinese Society of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2017:146-155. (in Chinese)
- [17] 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/OL]. 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 pig based on Kinect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):58-65. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190106&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190106&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.006. (in Chinese)
- [18] 孙伟,马占武. 基于RBF神经网络的点云滤波与空洞修复研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(2):105-108.  
SUN Wei, MA Zhanwu. Research on point cloud filtering and cavity restoration based on RBF neural network[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(2):105-108. (in Chinese)
- [19] ZHANG Yang, LIU Zhen, LI Xiang, et al. Data-driven point cloud objects completion. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(7):1514.
- [20] 罗开乾,朱江平,周佩,等. 基于多分支生成结构的点云补全网络[J]. 激光与光电子学进展, 2020:1-14.  
LUO Kaiqian, ZHU Jiangping, ZHOU Pei, et al. Point cloud shape completion network with multi-branches generation architecture[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020:1-14. (in Chinese)
- [21] 刘同海,滕光辉,张盛南,等. 基于点云数据的猪体曲面三维重建与应用[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6):291-295.  
LIU Tonghai, TENG Guanghui, ZHANG Shengnan, et al. Reconstruction and application of 3D pig body model based on point cloud data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):291-295. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140644&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140644&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.044. (in Chinese)
- [22] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):187-195. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180323&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180323&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.023. (in Chinese)
- [23] 沈蔚,王家为,王林振,等. 一种基岩海(岛)岸线自动提取新方法[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(6):975-981.  
SHEN Wei, WANG Jiawei, WANG Linzhen, et al. One new method of bedrock (island) coastline extraction[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(6):975-981. (in Chinese)
- [24] 杨艳,滕光辉,李保明,等. 基于计算机视觉技术估算种猪体重的应用研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2):127-131.  
YANG Yan, TENG Guanghui, LI Baoming, et al. Measurement of pig weight based on computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2):127-131. (in Chinese)
- [25] YANG Yan, TENG Guanghui, LI Baoming. Measurement of pig weight based on image analysis[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture (ISITA), 2005:5.
- [26] 李卓,毛涛涛,刘同海,等. 基于机器视觉的猪体质量估测模型比较与优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2):155-161.  
LI Zhuo, MAO Taotao, LIU Tonghai, et al. Comparison and optimization of pig mass estimation models based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2):155-161. (in Chinese)