Journal of System Simulation

Volume 29 | Issue 10

Article 13

6-4-2020

Measurement Error Correction Model of ToF Depth Camera

Le Wang

Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Luo Yu

Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Haikuan Wang

Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Minru Fei

Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Measurement Error Correction Model of ToF Depth Camera

Abstract

Abstract: 3D data intuitively reflects the full view of the target or scene. Time of Flight (ToF) camera is a range imaging sensor that can provide 3D geometric information of targets immediately, thus it is widely applied in the robot positioning and navigation, 3D reconstruction and other aspects etc. Due to the operational principle of the camera itself, there are variety measurement errors of the source data obtained by ToF, resulting in image distortion. The measurement errors in the imaging process of ToF camera were analyzed and summarized, and *the cubic spline interpolation method combined with look-up table was proposed to segment the compensation of the nonlinear depth offset to realize the adaptive error compensation process. A data correction model based on the pinhole model was proposed to tackle the data errors appeared during the process of coordinate transformation from Spherical Coordinate System to Cartesian Coordinate System, to restore the real scene more accurately. Experiment results show that the corrected depth data error and offset are effectively improved.*

Keywords

image processing, 3D Data, ToF camera, data correction, error compensation

Recommended Citation

Wang Le, Luo Yu, Wang Haikuan, Fei Minru. Measurement Error Correction Model of ToF Depth Camera[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2323-2329.

ToF 深度相机测量误差校正模型

王乐,罗宇,王海宽,费敏锐

(上海大学机电工程与自动化学院,上海市电站自动化技术重点实验室,上海 200072)

摘要:三维数据直观反映目标或场景的全貌信息,Time of Flight(ToF)深度相机能直接获取目标的三 维信息,在机器人定位与导航、三维重建等方面被广泛使用。但因自身结构特点,深度相机获取的 原始数据存在多种误差,成像出现畸变。实验对深度相机测量过程中出现的误差进行分析和总结, *提出利用查表法和三次样条插值相结合的方法对非线性的深度偏移进行分段补偿*,实现对非线性误 差进行补偿。基于针孔模型提出一种数据校正模型,解决了成像过程中数据从球面坐标系转换到直 角坐标系时出现的偏差,从而更好地复原真实场景中的深度数据。结果表明校正后的深度偏移和误 差得到有效改善。

关键词: 图像处理; 三维数据; ToF 相机; 数据校正; 误差补偿 中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 10-2323-07 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710013

Measurement Error Correction Model of ToF Depth Camera

Wang Le, Luo Yu, Wang Haikuan, Fei Minru

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: 3D data intuitively reflects the full view of the target or scene. Time of Flight (ToF) camera is a range imaging sensor that can provide 3D geometric information of targets immediately, thus it is widely applied in the robot positioning and navigation, 3D reconstruction and other aspects etc. Due to the operational principle of the camera itself, there are variety measurement errors of the source data obtained by ToF, resulting in image distortion. The measurement errors in the imaging process of ToF camera were analyzed and summarized, and *the cubic spline interpolation method combined with look-up table was proposed to segment the compensation of the nonlinear depth offset to realize the adaptive error compensation process. A data correction model based on the pinhole model was proposed to tackle the data errors appeared during the process of coordinate transformation from Spherical Coordinate System to Cartesian Coordinate System, to restore the real scene more accurately. Experiment results show that the corrected depth data error and offset are effectively improved.*

Keywords: image processing; 3D Data; ToF camera; data correction; error compensation

引言

随着工业智能水平的不断提高,快速且高精度



收稿日期:2017-05-20 修回日期:2017-07-19; 基金项目:上海市科委重大基础研究项目(14JC1402200); 作者简介:王乐(1992-),女,上海,硕士生,研究方 向为机器视觉;罗宇(1993-),男,上海,硕士生,研 究方向为机器视觉;王海宽(1977-),男,上海,博士 后,讲师,研究方向为嵌入式智能机器视觉。 的立体图像检测系统在各行各业都发挥了重要作 用,广泛应用于物流包裹分拣、工业零件尺寸测量、 机器人定位与导航、位姿估计、三维重建等方面^[1-3]。 为了获取目标的三维信息,通常情况下可以使用多 个 2D 相机构成双目或多目立体视觉系统,但这类 方法耗费成本高、系统体积较大,多幅图像特征点 提取与匹配算法的复杂度高,且结果不稳定。由于

http://www.china-simulation.com

第 29 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 29 No. 10
2017年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2017

实际应用环境的日趋广泛以及使用要求不断提高, 传统的三维视觉系统已经难以满足工业和生产要 求。ToF深度相机由于集成度高,可以一次性获得 场景的全貌信息,具有帧率高、结构紧凑、对光照 不敏感的优点,很快在三维视觉系统中被大量采用。

ToF 相机通过计算激光在相机与物体之间的 飞行时间来获取两者之间的距离信息,并同时获取 灰度信息,是一种高效的 3D 成像仪器。然而,由 于受自身成像特点影响和外界环境因素的干扰, ToF 深度相机获得的数据存在着畸变,漂移,抖动 等误差。因此,要想将 ToF 相机很好地应用于三维 视觉系统中以完成精确快速的测量任务,必须进行 ToF 相机数据的误差校正。

针对 ToF 相机误差及其矫正方法,国内外也进 行了不少研究。M. Stommel 和 C. Beder 分别使用一 些较为简单的线性模型来描述并修正误差^[4-5]。这类 方法虽然过程简单计算量小,但修正效果十分有限。 Stephan Hussmann 等人提出使用查找表的方法修正 深度误差。M. Lindner 等人提出了使用 B-Spline 函 数估计相机误差的方法^[6]。Jiyoung Jung 则借助深度 与彩色相机图像对 ToF 相机数据进行联合误差修正 ^[7]。Ying He 等人试图将数据学习的过程引入深度相 机的误差分析与矫正当中^[8]。Freedman D.等人则提 出使用多采集频率的方式提高深度相机的数据质 量^[9]。以上各种 ToF 相机数据的修正方法中,有的 方法简单易行但精度欠佳,有的方法则又因为满足 了精度但流程冗长实现复杂,还没有一个较完善的 在满足精度同时也不降低处理速度的校正方法。

本文主要对 ToF 相机的二维图像平面误差及 深度误差两大类误差进行修正。二维成像平面误差 采用棋盘格标定的方法加以解决。对于深度误差, 主要利用三次样条插值方法对不同深度下的深度 数据进行深度补偿。此外基于相机成像原理和深度 相机针孔模型,本文对由 ToF 相机测量原理导致的 系统性的深度高估进行了校正,结果表明校正后的 深度误差得到有效改善。

1 ToF 深度相机原理

ToF 相机通过测量光在传感器与物体表面之间 的飞行时间确定距离信息。飞行时间的测量方法基 本上可以分为脉冲/闪光式飞行时间系统、连续波式 飞行时间系统以及伪随机数序列式飞行时间系统以 及压缩感知式飞行时间系统 4 种。ToF 相机主要采 用连续波式的飞行时间测量方法,其结构图见图 1。



图 1 ToF 相机工作原理 Fig. 1 Working principle of ToF camera

ToF 相机在工作时,由光源发连续的调制光信 号,光信号在物体与相机之间飞行,并经物体表面 发生发射由光电器接受,通过计算探测器上累计的 电荷数得到发射性和与接受信号之间的相位差 Δφ,即可得到物体与相机的距离差 D,如公式(1)。

$$D = \frac{1}{2} \times C \times \frac{\Delta \phi}{2\pi f} \tag{1}$$

式中: C 为光速; f 为信号的调制频率。在调制频 率 f 和光速 C 确定的情况下,相位差 $\Delta \phi$ 的大小即 代表了距离的大小。为了得到相位差 $\Delta \phi$,可以利 用 接 收 信 号 与 发 射 信 号 之 间 的 自 相 关 函 数 ACF(Autocorrelation Function)进行分析,如图 2。 A_1, A_2, A_3, A_4 是相位依次相差 90°的相位,由此可得 相位差 $\Delta \phi$ 的计算公式:

$$\Delta \phi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \tag{2}$$

根据 A_1, A_2, A_3, A_4 ,也可以计算出接受信号的 强度 a(Amplitude),这影响到实际测量的精度和质量,如公式(3)。

$$a = \frac{\sqrt{(A_1 - A_3)^2 - (A_2 - A_4)^2}}{2}$$
(3)

灰度图像上每一个像素点的实际灰度值就是 图 2 中的 b, 计算公式如(4)。

(4)



Fig. 2 Autocorrelation function

2 ToF 相机的二维平面误差及其修 正方法

ToF 相机的二维平面误差主要分为两个方面, 一是相机镜头存在畸变时会引起误差,二是在相机 的生产安装过程中,镜头中心与传感器成像元件中 心不对应而产生误差。其中相机镜头的畸变较为普 遍。ToF 相机与普通二维相机的成像原理相同,都 是通过透镜聚集光线并在感光芯片上生成图像,因 此,二维相机内参数矩阵中的光心,焦距、畸变系 数等参数的计算方法同样适用于 ToF 相机。所以, 本文采用二维相机标定方法—棋盘格标定的方法, 对 ToF 相机产生的灰度图像进标定,计算得出 ToF 相机的相关参数。由前述的 TOF 相机原理可知, 在采集时,每一个像素点深度和灰度信息在同一块 感光芯片上先后读出,由灰度图像得到的相机内参 及畸变系数完全适用于深度图像的校正。

实验采用 5×8 的棋盘格进行棋盘校正,每个正 方形格子大小为 25 mm×25 mm,用深度相机共采集 10 张不同角度的棋盘格灰度图片,作为校正前的原 始图像,10 张棋盘格图片在空间的位置如图 3 所示。

图 4 左图为一张棋盘格图片。不难看出,从深 度相机得到的灰度图像带有较多的噪点,且对比度 不高。为了最大限度地提高标定精度并防止误匹配 现象的发生,这里首先将灰度图片进行直方图均衡 化处理以提高对比度。处理结果如图 4 所示。



图 3 棋盘格校正图片空间位置示意图 Fig. 3 Spatial location of checkerboard images



图 4 直方图均衡化(左图为原图,右图为效果图) Fig. 4 Histogram equalization

通过棋盘标定可以得到相机的内参矩阵:

$$I = \begin{bmatrix} f / d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f / d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(5)

内参矩阵如式(5), *f* 代表相机的焦距, *d_x*为实际单位像素在 *x* 轴方向上的长度, *d_y*为实际单位像素在 *y* 轴方向上的长度, (*u*₀,*v*₀)为光圈中心。

由于相机镜头属于光学系统,存在畸变误差, 如径向畸变和切向畸变等,畸变会导致图像点的坐 标发生偏移,相机上普遍存在的是径向畸变误差, 其数学模型如下:

 $\hat{u} = u + (u - u_0) \times [k_1 \times (x^2 + y^2) + k_2 \times (x^2 + y^2)^2]$ $\hat{v} = v + (v - v_0) \times [k_1 \times (x^2 + y^2) + k_2 \times (x^2 + y^2)^2]$ (6)

式中: (*u*,*v*)代表理想无畸变的像素坐标; (*û*,*v̂*)代表径像畸变情况下的像素坐标; (*x*,*y*)代表理想无畸变时的连续图像坐标; *k*₁,*k*₂代表两阶的畸变参数。经过棋盘标定最终得到的相机内参和畸变系数如公式(7)。

http://www.china-simulation.com

第 29 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 29 No. 10
2017年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2017

$$I = \begin{bmatrix} 210.88 & 0 & 168.340 \\ 0 & 211.12 & 138.013 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(7)
Distortion = [-0.369,0.134]

利用上述内参矩阵和畸变参数对深度图像校 正,校正结果如图5所示。可以看出,原始图在边 缘部分出现的畸变得到了很好的校正。



rig. 5 Concerton of Deptir Intege

3 ToF 相机的深度误差及修正方法

由于受到自身成像特点的影响和外界环境干扰,ToF相机获取的深度数据存在误差。这些误差 基本上可以分为两类:非系统误差和系统误差。本 文先对由外界噪声等其他不可控因素引起的非系 统误差同深度相机的偏移进行统一校正,再对由于 硬件特点产生的系统误差进行校正。

3.1 非系统误差与深度偏移的校正

非系统误差通常由于不同的使用环境引起,如 环境噪声、运动模糊、光的散射以及物体表面材质 不同所引起的反射率不同等等,需要具体问题具体 分析,因此本文在此分析几种常见的非系统误差。

与普通的二维相机接收环境中的可见光不同, ToF 相机接收的是激光,其光源由 ToF 相机本身提 供。因此,在相同的相机曝光时间条件下,由于物 体距离分布的不同,靠近相机的点易出现过饱和, 远离相机的点易出现曝光不足的现象。这就会导致 测得的深度存在一定的漂移^[10]

同时,由于激光的散射以及漫反射,相机发出 的部分激光可能通过多次反射才被相机收到。这种 误差的分布同距离有一定的关系,通常距离相机越 近,散射现象越严重^[11]相机工作时间不同,芯片的 温度发生变化,也会产生深度上的漂移。为了降低 温度引起的偏差,通常的做法是在同一实验条件下 保持相同的预热时间,通过实验结果比对,开机时 间在 10~20 min 后再进行图像采集,获得的数据相 对更加稳定和准确。

深度偏移是指 ToF 相机的测量值与实际深度值 之间存在差值。由于 ToF 相机自身成像特点以及受 光源频率和强度的影响,相机直接得到的深度数据 与实际深度总有一个固定的偏移值,这种偏移值又 与 ToF 相机的多次散射、曝光时间等误差高度耦合, 难以对其中单独某一误差进行单独建模并加以消 除。要想解决耦合误差下引起的深度偏移,需要得 到具体深度下对应的深度偏移值,再用实际测量值 减去,从而得到较为准确的实际深度值。

鉴于深度偏移具有非线性且与其他误差高度 耦合的特点,本文采用构建深度偏移查询表的方法 对这种深度偏移进行补偿。实验以每10 cm 为单位, 对 30~450 cm 范围内共 42 组深度距离进行测量,通 过与实际准确深度值对比,得到每组测量值与实际 值的深度偏移值 42 个,具体的深度偏移值如图 6, 以此作为深度偏移查询表的基础。本文使用插值方 法,对每 10 cm 范围内各点的深度偏移进行插值运 算,以此来补偿实测数据区间过大的不足。基于图 6 偏移值的分布形式本文采用插值结果较为平滑的 三次样条插值方法,对 42 组深度偏移数据中每两 个数据点之间使用多次多项式(三次)函数连接建 一个三次样条,样条函数如公式(8)。

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x), x \in [x_0, x_1] \\ S_1(x), x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ S_{n-1}(x), x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases}$$
(8)

实际应用中,三次样条插值结果可以一并存储 为深度偏移查询表,以便 ToF 相机在不同深度范围 下使用时,能快速查找到合适的深度偏移值进行补 偿。最终得到深度数据偏移查询表的分布图如图 7。



3.2 系统性深度高估误差及校正

系统性深度高估是指由 ToF 相机自身硬件系 统产生的深度距离高于实际距离的情况。实际工作 过程中如图 8 所示。





ToF 相机采集到的数据是被测点 A 到相机的直 线距离 r_A, 而非被测物体平面 o_a 到相机所在平面 o 的垂直距离 *d*,且通常情况下,这种直线距离 *r_A* 总是大于垂直距离 *d*,即出现深度值被过高估计的 情况。同一物体平面上的三个点 *A*,*B*,*C*,仅有 *B* 点 与相机光圈中心点(*u*₀,*v*₀)在同一水平上,因此通过 深度相机测得的此点深度值 *r_B=d* 为准确值。

可以看出,同一物体平面上具有相同深度的待 测点,越靠近镜头的光圈中心,到相机平面的距离 越短,也越接近垂直距离 *d*。而离镜头中心越远, 即处在镜头视角边缘处的点,到相机平面的深度就 会被系统性地高估。这种高估对后续的三维图像重 建以及图像处理都会产生很大影响,如图9是用深 度相机实测距离为1m的平面的场景示意图,图10 是利用深度相机测量得到的深度数据进行三维重建 的复原图。可以看出,距离光圈中心越远,三维图 像中对深度的高估越明显,即光圈中心附近深度值 更接近1m,边缘点深度值则偏大。



图 9 ToF 相机平面测量示意图 Fig. 9 Plane measurement of ToF camera



Fig. 10 Reconstruction of ToF camera data

为修正这种误差,文献[12]中提出了通过多个 查找表相互配合修正的方法,只适用于较近的范

http://www.china-simulation.com

第 29 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 29 No. 10
2017年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2017

围。文献[13]中提出了为每一个像素点计算一个修 正系数的方法修正等等。这些方法都需要在使用相 机前进行大量修正实验,计算复杂度高且时间消耗 大。通常情况下,修正精度与实验精度密切相关, 故此类方法对实验设备要求较高。基于此,本文提 出一种基于小孔成像原理的深度数据校正模型,通 过相机的固有参数直接进行修正,无需在相机使用 前进行实验。

首先建立深度相机的模型,这里采用小孔成像 的模型,如图 11 所示。图中: *o*_b为成像平面中心; *o* 为照相机平面中心; *o*_a物体所在平面的中心; 点 *p* 为三维空间中一点; *p*'为*p* 点在成像平面上的对 应点; *f* 为焦距; *d* 为物体所在平面到深度相机平 面的垂直距离; *r* 为深度相机实际测量的直线距离; *θ* 为激光光线与光心中轴线的夹角,根据光的直线 传播原理, *θ=θ*',垂直距离 *d* 与深度相机测量值 *r* 之间有的几何关系可表示为公式(9)。

d=*r*×cosθ (9) 式中:*r*为深度相机的实际测量值,只需得到θ,就 可对每个点的深度值进行修正;*o*_b*p*′为成像平面上*p*′ 像点到成像平面中心点的像距,则θ′可以表示为:



Fig. 11 Imaging model of ToF

深度图在深度相机中以二维像素矩阵的形式 存在。由于连续的成像平面和离散的图像像素坐标 之间存在转换关系,所以这里的 obp'实际代表离散 图像像素坐标系中像素点的真实距离,p'点在连续 成像平面坐标系中的位置已知为(x,y)。连续成像平 面和离散图像像素平面坐标系的转换关系如图 12。



图 12 成像平面与图像坐标系转换关系 Fig. 12 Coordinate transformation of imaging plane and pixel coordinate

图 12 中, *u*-v 代表离散的像素坐标系; *x*-y 代 表连续的图像坐标系; *p'*(*x*,*y*)从连续成像平面转换 到离散图像像素坐标系中的坐标为(*u*_{p'},*v*_{p'}),可由 式(11)得到。

$$u_{p'} = \frac{x}{dx} + u_0$$

$$v_{p'} = \frac{y}{dy} + v_0$$
(11)

式中: dx 代表 x 轴方向一个像素的真实物理宽度, dy 代表 y 轴方向上一个像素的真实物理宽度。这 两个宽度是成像芯片的固有参数,可通过查阅芯片 手册得到。相机芯片不发生变化, dx, dy 的数值 就不会改变。(u₀,v₀)为图像平面的中心点,即相机 光圈中心在图像平面上的投影点,可以通过标定获 得。至此, o_bp'的距离可以由式(12)得到:

$$o_b p' = \sqrt{\left(u_{p'} - u_0\right)^2 + \left(v_{p'} - v_0\right)^2} \tag{12}$$

联立式(9)~(12),可得到最终的深度垂直距离 d,如公式(13):

$$d = r \times \cos(\arctan(\frac{\sqrt{(u_{p'} - u_0)^2 + (v_{p'} - v_0)^2}}{f})) (13)$$

应用这种深度校正模型,对图 10 进行修正, 最终修正结果如图 13 所示。可以看出,之前存在的 边缘明显深度高估均已消除,测量所得的数据基本 在同一深度范围内,此时的深度数据已经能相对准 确的代表空间中各点到相机平面的真实距离。由于 ToF 相机采用飞行时间法测量距离,所以图中不平 整的平面代表了实际的深度数据存在一定的抖动, 这种抖动可以在应用时根据测量目标的实际情况选 用合适的滤波方及其参数加以去除,如双边滤波, 中值滤波等。



4 结论

本文分析和总结了 ToF 深度相机在成像过程 中出现的误差,对常见的如温度、光照引起的一般 性误差提出简单可行的解决方法。利用棋盘标定得 到相机的内参矩阵和畸变系数,对光学系统中出现 的畸变进行校正。为解决多种误差耦合造成的非线 性深度偏移,本文采用三次样条插值方法,在实测 42 组数据的基础上的得到深度偏移的查询表。根 据针孔模型提出一种深度数据校正模型,从成像平 面推导出物体平面到相机平面的垂直距离计算公 式,使球面坐标系中同一平面的深度数据准确转换 到直角坐标系中,最终校正效果图表明文中提出的 深度校正模型可行有效。

参考文献:

- Francis S L X, Anavatti S G, Garratt M, et al. A ToF-camera as a 3D Vision Sensor for Autonomous Mobile Robotics [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems (S1729-8814), 2015, 12(11): 1-15.
- [2] Alenyà G, Foix S, Torras C. ToF cameras for active vision in robotics [J]. Sensors and Actuators A: Physical (S0924-4247), 2014, 218(218): 10-22.
- [3] Brachmann E, Krull A, Michel F, et al. Learning 6D Object Pose Estimation Using 3D Object Coordinates [C]// Computer Vision – ECCV 2014. Germany: Springer, Cham, 2014: 536-551.
- [4] Beder C, Koch R. Calibration of Focal Length and 3D

Pose Based on the Reflectance and Depth Image of a Planar Object [J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies & Applications (S1740-8865), 2008, 5(3/4): 285-294.

- [5] Mills J P, Chandler J H. ISPRS Commission V Symposium: Image Engineering And Vision Metrology
 [J]. Photogrammetric Record (S0031-868X), 2007, 22(117): 94-96.
- [6] Lindner M, Schiller I, Kolb A, et al. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing [J]. Computer Vision and Image Understanding (S1077-3142), 2010, 114(12): 1318-1328.
- Jung J, Lee J Y, Jeong Y, et al. Time-of-Flight Sensor Calibration for a Color and Depth Camera Pair [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2015, 37(7): 1501-1513.
- [8] He Y, Liang B, Zou Y, et al. Depth Errors Analysis and Correction for Time-of-Flight (ToF) Cameras [J]. Sensors (Basel, Switzerland) (S1424-8220), 2017, 17(1): 92-110.
- [9] Freedman D, Smolin Y, Krupka E, et al. SRA: Fast Removal of General Multipath for ToF Sensors [C]// Computer Vision-ECCV 2014. Germany: Springer, Cham, 2014: 234-249.
- [10] Fuchs S, May S. Calibration and registration for precise surface reconstruction with Time-Of-Flight cameras [J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies & Applications (S1740-8865), 2008, 5(3/4): 274-284.
- [11] Kirmani A, Benedetti A, Chou P A. SPUMIC: Simultaneous phase unwrapping and multipath interference cancellation in time-of-flight cameras using spectral methods [C]// 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [12] Hussmann S, Huhn P, Hermanski A. Systematic distance deviation error compensation for a ToF-camera in the close-up range [C]// 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. USA: IEEE, 2012: 1546-1550.
- [13] Hussmann S, Holtorf T, Knoll F. Investigation of different polar to Cartesian coordinate system conversion methods for ToF-cameras in the close-up range [C]// 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. USA: IEEE, 2015: 1072-1077.