

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206125

基于相对定位技术实现对 Apriltags 测量范围拓展的研究

陈曼桐 侯培国

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: Apriltags 标签定位在远距离测量时会出现定位精度不高的问题。本文对其形成原因进行了简要的分析,并提出了一种基于相对定位技术实现对 Apriltags 标签纵向测量准确度的提升和纵向测量范围拓展的方法。该方法通过将长距离分解为多段短距离的叠加以实现在保证测量精度的前提下对长距离 Apriltags 标签的空间位姿测量。当直接测量与间接测量结果均存在时,通过数据融合的方式结合两种测量方法各自的优势。该方法可以在保证横向距离与高度测量准确度的情况下,有效提升中远距离下标签的纵向距离测量准确度。仿真实验与真实实验验证了该方法的有效性,并实现了在 3 m (12.5 倍标签尺寸)的中远距离情况下绝对测量误差降低 1 dm,相对测量误差降低 0.45%。

关键词: 单目视觉;位姿测量;Apriltags;相对定位

中图分类号: TP242

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.40;510.80

Method to expand the measuring range of Apriltags based on relative positioning

Chen Mantong Hou Peiguo

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: There is a problem of low positioning accuracy when using Apriltags to measure tags in long distance. In this paper, we analyze the causes of the problem, and propose a method to improve the longitudinal measurement accuracy and range of Apriltags based on relative positioning technology. This method solves the problem by dividing long distance into few short distance and obtains the space position by calculating with ensuring the measurement accuracy. When both direct measurement and indirect measurement results exist, combine the respective advantages of the two methods through the way of data fusion. This method can effectively improve the longitudinal distance measurement accuracy of tags at medium and long distances while ensuring the measurement accuracy of transverse distance and height. We verified the effectiveness of the method by conducting the simulation experiments and real experiments, achieved the reduction of 1 dm absolute measurement error and 0.45% relative measurement error at a distance of 3 m (equal to 12.5 times the tag size).

Keywords: monocular vision; pose estimation; Apriltags; relative position

0 引言

单目视觉作为机器视觉领域的一个重要分支而受到广泛的关注,常被应用于机器人学^[1]、车辆跟踪与定位^[2]、地图构建^[3]和零件检测^[4]等领域。其优势在于结构简单、标定容易,同时规避了多相机之间耦合所带来的额外计算需求问题。

在众多方法中,美国密歇根大学的 Olson 教授于

2010 年提出的 Apriltags 标签^[5],由于兼具追踪与定位功能,受到越来越多的关注。Apriltags 标签系统是一种基于单目视觉的定位系统,在车辆跟踪、无人机降落、对接引导和姿态测量等领域有着广泛的用途。在此基础上,国内外众多研究团队对其进行了深入的研究。

早期的一些研究更专注于 Apriltags 标签的性能。部分团队分析了标签在定位时的测量精度并提出了一些改进方案^[6-7]。另一些团队则将 Apriltags 标签与其他类似的标签进行了比较^[8-9]。

Apriltags 标签的一个常见用途是用于无人机定位。Zhenglong 等^[10]研究了如何将标签应用于无人机位姿测量领域。Apriltags 标签同样常被用于实现两个物体的对接。Abhijith 等^[11]研究了使无人机准确降落于贴有标签的充电平台的方法。Fan 等^[12]将标签应用于无人车对接入库。Mangelson 等^[13]则通过设置巨型标签实现了船舶间相对运动速度和夹角的计算。此外,还有一些对 Apriltags 标签较为新颖的应用。Whelan 等^[14]研究了如何利用 Apriltags 标签使应用三维结构光进行扫描建模时可以准确识别镜子和反光玻璃。Tang 等^[15]建立了一个 Apriltags 标签阵列,并使用它来校准相机。

同样地,国内的研究团队对 Apriltags 标签也进行了深入的研究。除去较为经典的跟踪、对接^[16]、定位^[17]与无人机降落^[18]外,也有一些比较有特色的研究结果。焦传佳等^[19]整理并优化了 Apriltags 的图像处理流程。贾配洋等^[20]通过引入卡尔曼滤波算法,实现了对标签的检测速度的大幅提升。

上述学者对标签的研究主要集中在两个方向。一是近距离条件下的准确定位,基于此时标签能提供准确度很高的六自由度位姿信息。二是远距离条件下的追踪引导,基于标签的编号信息有利于持续跟踪,以及长距离下标签能够提供对负反馈而言可以接受的测量误差。应用 Apriltags 标签进行远距离定位的相关研究并不十分普遍。这主要是因为,在图像中标签尺寸与距离呈反比关系,而较小尺寸的标签会严重影响测量的准确性。因此,本文提出了一种借助中转标签进行相对定位的方法,实现了对 Apriltags 标签远距离测量准确度的提升和测量距离的拓展。通过仿真实验和真实实验说明了该方法的可行性,并讨论了影响其测量准确度的一些因素。

1 基本原理

1.1 Apriltags 识别算法

Apriltags 识别算法主要包含 3 个部分,分别为检索、识别与解算。检索部分负责搜索可能是标签外边框的四边形。识别部分负责对检索部分提供的候选四边形进行识别。解算部分对识别成功的标签的空间位姿进行解算。图 1 以过程数据的形式展示了 Apriltags 识别定位算法的工作过程。其中,图 1(a)~(d)属于检索部分,图 1(e)为识别过程样例,图 1(f)为解算结果,体现为两平面间的单应矩阵 H 。

在检索部分,程序会寻找图像中可能是标签的四边形区域,并对其 4 个角点的坐标进行记录,坐标值精确至亚像素量级。对识别成功的标签,使用角点坐标计算标签真实坐标。为此,要在标签所在平面 s_1 与照片平面 s_2 间建立映射,即求取二者间的单应矩阵 H 。

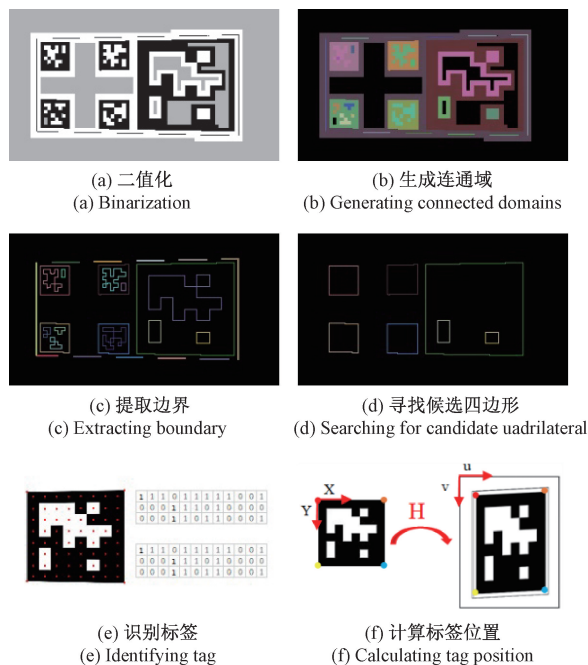


图 1 Apriltags 算法识别流程示例

Fig. 1 Example of Apriltags algorithm recognition process

$$s_1 \sim H_{3 \times 3} \times s_2 \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

将式(2)展开,得:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{h_{11}u_2 + h_{12}v_2 + h_{13}}{h_{31}u_2 + h_{32}v_2 + h_{33}} \\ v_1 = \frac{h_{21}u_2 + h_{22}v_2 + h_{23}}{h_{31}u_2 + h_{32}v_2 + h_{33}} \end{cases} \quad (3)$$

映射具有尺度不变性,体现为式(3)中将 h_{ij} 替换为 kh_{ij} 后,右侧分式值保持不变。此时,通过调整 k ,可以使 h_{33} 成为需要的任何值。令 $h_{33} = 1$ 。

此时单应矩阵 H 的未知量数目为 8。而标签的 4 个角点的坐标可建立 8 个方程,满足求解 H 的最低方程数。

另一方面,Apriltags 标签定位满足小孔成像模型,故有:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A_{3 \times 3} [R_{3 \times 3} \quad T_{3 \times 1}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: s 为尺度因子; $A_{3 \times 3}$ 为相机内参,由张正友标定方法标定相机后得到,为已知量。

结合式(4)与式(1),可以得到:

$$H = A_{3 \times 3} [R \quad T] \quad (5)$$

由于 H 已在前文解出,旋转矩阵 R 与平移矩阵 T 可

被解出。标签中心点坐标可由 $N_0(x_c, y_c, z_c) = -T^T$ 解出。标签的俯仰角、航偏角和滚转角亦可由旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 解算得到, 具体为:

$$\begin{cases} \psi = -\arcsin R_{31} \\ \theta = \arctan \frac{R_{32}}{R_{33}} \\ \varphi = \arctan \frac{R_{21}}{R_{11}} \end{cases} \quad (6)$$

然而, Apriltags 算法在测量标签空间位姿时, 存在一定问题, 表现为当标签与相机距离较远或方位角较大时, 对标签方位角的测量存在较大的误差。本文对同一平面上的 4 个标签进行了一次测量, 该平面的中心与相机镜头中心的距离为 (250, 250, 1 500) mm, 方位角为 (0, 52.5, 0) ($^\circ$)。测得的方位角分别为 (-20.513 4, 52.114 2, -14.259 0), (27.646 1, 49.496 4, 18.508 8), (9.713 0, 52.959 3, 6.736 4) 和 (3.733 6, 51.869 7, 0.999 0) ($^\circ$)。可以明显看出, 几次测量之间存在较大的差值, 且与真实值相符的程度很差。

上述原因在于计算单应矩阵 H 时只使用了 4 个角点的坐标, 仅仅满足解出方程的最低数量限制, 使解出的单应矩阵 H 受到角点坐标的影响非常大, 几个像素的变动带来较大的方位角误差。

为验证该结论, 对同一标签进行了两次测量。两次测量的区别在于标签右下角角点的 y 值存在 2 px 的差值, 测量得到的方位角差值为 (-6.7, 17.9, 1.2) ($^\circ$)。

由于以上原因, 在远距离与大方位角的情况时, Apriltags 标签不能提供较好的空间位姿信息。

1.2 基于中转标签的相对定位算法

为解决上述问题, 本文提出了一种基于相对定位的远距离 Apriltags 空间位姿测量方法。该方法设立中转标签, 将长距离分解为数段短距离的拼接, 利用标签在短距离时的高定位准确度实现测量。其基本原理如图 2 所示。

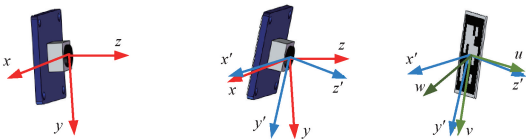


图 2 相对定位原理

Fig. 2 Principle of relative positioning

为解决因距离过长造成左侧相机对标签的测量具有很大的误差问题, 本文引入中转标签系统, 其实质为一对背对背固定的标签与相机组合体。左侧相机对中间相机背后的标签进行测量, 确定其空间位姿信息。同时, 中间相机对右侧标签进行测量, 确定其在中间相机坐标系下

的空间位姿信息。利用之前得到的中间相机在左侧相机坐标系下的空间位姿信息, 实现坐标系转换, 得到标签在左侧相机坐标系同时也是世界坐标系下的坐标。

设左侧相机测量得到的中间相机的空间位姿信息为 $[R_1 \ T_1]$, 中间相机测得的标签空间位姿信息为 $[R_2 \ T_2]$ 。则右侧标签在左侧相机坐标系下的位置信息 $T = T_1 + R_1 \times T_2$, 旋转矩阵 $R = R_1 \times R_2$ 。方位角可由旋转矩阵 R 通过式(6)解出。

该方法存在推广至有多个中转标签情况的可能。本文在此不做展开, 仅从误差分析的角度进行简单推导。假设各设备按照相机, 中转标签 1, 中转标签 2, ..., 中转标签 n , 目标标签的顺序从左至右排列。设各相机测得的右侧标签的空间位姿分别为 $[R_i \ T_i]$, $i \in [1, n]$, 则目标标签的空间位姿可表示为:

$$\begin{cases} R = \prod_{i=1}^n R_i \\ T = T_1 + \sum_{i=2}^n T_i \prod_{j=1}^i R_j \end{cases} \quad (7)$$

当测量误差存在时, 设 $R_i = R_i^0 + \Delta R_i$, 则式(7)中的 T 可以改写为:

$$T = T_1 + \sum_{i=2}^n T_i \prod_{j=1}^i (R_j^0 + \Delta R_j) \quad (8)$$

令 $i = n$, 可得 T_n 项前的系数为 $\prod_{j=1}^n (R_j^0 + \Delta R_j)$, 其中含有 ΔR_j 的项共有 $2^n - 1$ 项。即 n 越大, 最右侧相机对目标标签进行测量时引入的误差项就越多。故在实际情况下, 应尽可能控制 n 的大小即中转标签的数量。将式(8)全部项展开后重新整理, 可得到 ΔR_1 项前面的系数为:

$$T_2 + \sum_{i=3}^n T_i \prod_{j=2}^i R_j \quad (9)$$

式(9)表明, 首个相机对中转标签的测量误差将会影响后续的每一次测量结果。因此离目标标签位置越远的相机, 其测量准确度应当越高, 尤其是对角度测量的准确度。

由于对中转标签方位角的测量存在误差, 因此使用间接定位测得的空间位姿数据中, 横向距离 x 和高度 y 的测量准确度较差, 并且受测得的中转标签方位角误差影响较大, 纵向距离 z 受方位角误差的影响极小; 直接对标签进行测量时得到的测量误差准确度刚好相反。

因此, 当中转标签不会对相机直接测量目标标签产生妨碍, 即间接定位结果与直接定位结果可以同时存在时, 可以通过数据融合的方式结合两种测量方式的优点, 得到更准确的测量结果。

在仅对部分点位进行测量时, 本文主要通过设定权重系数的方法来融合两种测量方式的结果。由于标签本身具有旋转不变性, 因此横向距离 x 与高度 y 具有轮换对称性。故横向距离和高度的权重系数可以设定为同一

个数值为 α_1 , 纵向距离对应的权重系数设为 α_2 , 则有 $\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_1 \quad \alpha_2]^T$ 。本文设定 $\alpha_1 = 0.8, \alpha_2 = 0.2$ 。

设使用直接定位测得的目标标签位置信息为 $X_1 = [x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T$, 使用间接定位测得的目标标签位置信息为 $X_2 = [x_2 \quad y_2 \quad z_2]^T$ 。则数据融合后的测量结果为:

$$X = \alpha X_1 + (1 - \alpha) X_2 \quad (10)$$

在进行连续测量时, 本文主要通过对两种测量方法得到的测量结果进行自适应权重加权后, 通过卡尔曼滤波的方式进一步融合数据的方法来提升测量准确度。卡尔曼滤波的状态转移方程可表示为:

$$\begin{cases} X_{k,k-1} = F X_{k-1,k-1} \\ X_{k,k} = X_{k,k-1} + K_k (Z_k - H X_{k,k-1}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $X_{k,k-1}$ 代表当前状态的预测值; $X_{k,k}$ 代表当前状态的修正值, 即卡尔曼滤波后的输出值; Z_k 代表传感器测量得到的观测值, 在此处即为由式(11)计算得到的加权后的测量结果 X ; K_k 代表当前时刻的卡尔曼滤波参数, 由上一时刻的协方差 P_{k-1} 与两个预先测量得到的超参数 Q, R 共同计算获得。

然而, 机械地使用同一个权重值进行简单加权不能够很好地适应所有数据, 因此, 在此基础上, 本文进一步提出了一种自适应权重的方法, 依据当前卡尔曼滤波器的输出值动态的调整权重数值, 以便更好地进行数据融合。

将式(11)中计算得到的 $X_{k,k}$ 作为参考量代入式(10)中计算两测量结果在其中所对应的权重 α' 。使用式(12)限制其上下限, 得到新的权重 α'' :

$$\alpha'' = \begin{cases} \alpha + (\alpha' - \alpha) \times 0.5, \alpha' \in A \\ A = [\alpha - 0.2, \alpha + 0.2] \\ \alpha - 0.1, \alpha' < \alpha - 0.2 \\ \alpha + 0.1, \alpha' > \alpha + 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

使用新的权重代入式(10)重新计算加权结果, 记为 X' 。

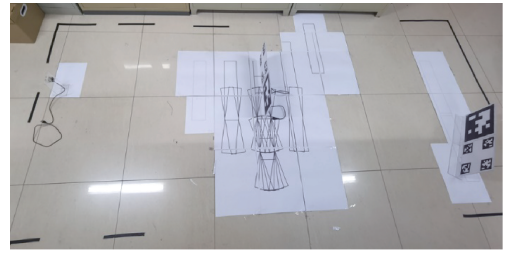
以 X' 作为新的观测值 Z_k , 重新使用式(11)计算重新加权后的卡尔曼滤波输出值 $X_{k,k}$, 并将之作为最终的测量结果。

2 实验

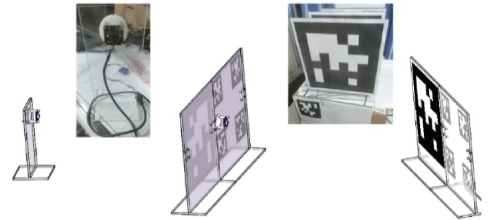
2.1 实验设计

为验证上述方法可行性, 本文搭建了实验平台, 依据现有实验条件进行仿真实验与真实实验。实验设备分为4个部分, 分别为地标、相机、目标标签与中转设备, 其整体实物图与局部放大图如图3所示。

在第1节中给出了在使用中转标签进行间接定位时目标标签的空间位姿计算方法。目标标签的空间位姿信



(a) 整体实物图
(a) Overall physical image



(b) 局部放大图
(b) Partial enlargement image

图3 实验所用设备

Fig. 3 Equipment used in the experiment

息为 $[R \quad T]$, 有:

$$\begin{cases} T = T_1 + R_1 \times T_2 \\ R = R_1 \times R_2 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可以发现, 无论是坐标还是方位角的计算, 均需要使用旋转矩阵 R_i 。这说明对标签方位角(等价于旋转矩阵)的测量, 在很大程度上会影响到最终结果。前文中指出, 由于仅使用4个角点计算单应矩阵 H , Apriltags 标签在远距离时存在方位角测量误差较大的问题。

为此, 在设计用于测量的标签时, 使用不同标签(组)分别承担距离测量和方位角测量任务, 如图4所示。在一侧, 使用一个大尺寸的标签用于距离测量。在单目视觉测量中, 标签越大, 能保持距离测量准确度的纵向距离选择范围越大。在另一侧, 使用4个平行排列的小标签进行方位角测量。位于同一平面的标签越多, 用于解算单应矩阵 H 的方程数越多, 解得 H 的准确度就越高, 越不容易因为某个角点存在的几个像素的误差而影响到测量的结果。在前期的工作中, 本文曾分析过, 在 3×3 的格子中, 使用排列于九宫格四角的4个标签的排列方式, 能够得到最佳的测量准确度。本文选择使用该方案以实现对方位角的测量。

为避免多个中转标签所带来的实验复杂度提升和变量引入问题, 综合现有实验条件综合考虑, 在实验1~6中, 将中转标签数量设定为1。此外, 设置实验7, 对多中转标签情况进行单独分析讨论。

为研究中转标签的不同放置位置与角度对测量结果的影响, 采用控制变量法设计了4组实验。实验1~3

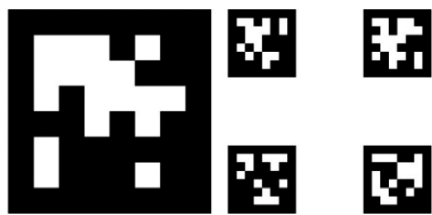


图 4 测量用标签

Fig. 4 Tag for measurement

中,中转标签处于静止状态。实验 4 中,标签处于低速随机运动状态。实验 1 和 2 的主要变量分别为位置和航偏角,实验 3 中两变量均进行变化。

在实验 1 中,为中转标签设定了 7 个可能的位置。以 $(0,0,1\ 500)$ mm 为基准,分别向右方向、靠近相机方向和同时向左与远离相机的方向做两次等距移动。在实验 1 中,各中转标签的方向角保持不变,为 $(0,0,0)(^\circ)$ 。

在实验 2 中,中转标签共有两个可能的位置,分别为 $(250,0,1\ 500)$ mm 和 $(500,0,1\ 500)$ mm。与此同时,在每个位置,中转标签的航偏角 θ 共有 5 种可以选择的值,分别为 0° 、 $\pm 7.5^\circ$ 和 $\pm 15^\circ$ 。

在实验 3 中,为中转标签设定了 4 个可能的位置,分别为 $(250,0,1\ 500)$ mm、 $(500,0,1\ 500)$ mm、 $(250,0,1\ 250)$ mm 和 $(250,0,1\ 750)$ mm。与此同时,在每个位置,中转标签的航偏角 θ 共有 4 种可以选择的值,分别为 0° 、 $\pm 7.5^\circ$ 和 15° 。剔除某些会导致标签无法被识别的角度,得到 9 个中转标签可能的空间位姿参数。

在实验 4 中,中转标签没有确定的移动轨迹,在水平面上随机低速运动,这是为了尽可能模拟真实情况。

为增强结论普适性,本文改变了各实验中目标标签的空间位姿。实验 1 中,目标标签位于相机正前方 3 000 mm 处,垂直于相机光轴。实验 2 中,目标标签在实验 1 标签位置的基础上右移 500 mm,方向保持不变。实验 3 与实验 4 中,目标标签的空间位姿相同,与实验 2 标签位置保持一致,但额外增加 30° 的航偏角。

在测得目标标签与中转标签的空间位姿信息后,根据式(13)计算目标标签在世界坐标系中的空间位姿。将得到的结果与不使用中转标签由相机直接测量得到的目标标签空间位姿进行对比,并得出结论。

为验证数据融合对测量准确度的提升效果,本文设计了实验 5。在实验 5 中,目标标签选择 6 个可能的位置,其横向距离可取值为 500 mm 和 1 000 mm,纵向距离取值以 3 000 mm 为初值 500 mm 为步长向下迭代。当 x 取 1 000 时, z 最低可取 2 500;当 x 取 500 时 z 最低可取 1 500。调整中转标签位置使测量相机可以同时观测到完整的中转标签和目标标签,此时直接测量结果与间接

测量结果同时存在。对两个测量结果进行数据融合以提高测量结果的准确度,分别计算 3 种测量方法各坐标分量的测量误差与合成误差,并进行对比。

为验证在连续测量时采用卡尔曼滤波进行数据融合的效果,本文设计了实验 6。在实验 6 中,目标标签自 $(0,0,1\ 000)$ mm 处以 $(0,-15,0)(^\circ)$ 的方位角出发,沿垂直于标签的 $(0,75,0)(^\circ)$ 方向做匀速运动,在 y 轴分量上前行 2 500 mm。中转标签以相似的轨迹进行移动以进行间接测量。利用仿真实验具有的实验过程可以完全复现的性质,绕过中转标签对目标标签的遮挡问题,分别得到对目标标签的直接测量数据与间接测量数据。对数据分别使用加权平均与卡尔曼滤波的方式进行数据融合,并对比以上 4 种测量方式的测量效果。

为对第 1 节中提到的多中转标签的情况进行分析验证,本文设计了仿真实验 7。在实验 7 中,目标标签的位置和方位角与实验 3 中相同,为 $(500,0,3\ 000)$ mm 和 $(0,30,0)(^\circ)$ 。在目标标签与相机之间,设置两个中转标签,其位置与方位角值已知,各中转标签仅在 x,z 方向上移动和 θ 分量上旋转。改变各中转标签位置与方位角,进行多次实验,同时计算使用中转标签时各标签测量值与真实值的误差,进行纵向对比。此外,将得到的数据与实验 3 中的数据进行对比,分析中转标签数量的增加对目标标签测量准确度的影响。

2.2 仿真实验

在仿真实验中使用 Solidworks 进行仿真,用表面图案为图 4 样式的薄立方体模拟标签,利用“配合”将标签固定在需要的位置,并调用软件内置的相机以实现图像采集。

在采集数据前,首先使用张氏标定法对相机进行标定。在图片尺寸为 $1\ 376 \times 774$ 时,标定结果如下:

- 1) 焦距: x 轴 1 191.8 mm, y 轴 1 189.8 mm;
- 2) 主点: 横向 685.26 px, 纵向 382.52 px;
- 3) 径向畸变: $k_1 = -4.23 \times 10^{-4}$, $k_2 = 4.4 \times 10^{-3}$;
- 4) 切向畸变: $p_1 = 0$, $p_2 = 0$ 。

2.3 真实实验

在真实实验中,地标部分由数张 A3 纸拼接而成,目的是在现有条件下,确保因实验设备位置不够准确而引入的误差最小化。本文计算了每场实验中各标签在目标位置时的位置和角度,并在 A3 纸上以粗黑线的形式描绘其外边框。在绘制时将分辨率设置为 300 dpi,相当于 11.8 px/mm。这使得当标签和相机被正确放置时,由移动设备引起的误差可以控制在毫米量级。

相机部分包括以下内容:USB 相机,型号 USB\Zh-SI298L,焦距 28 mm;T 型亚克力立牌;铜柱和固定用塑料垫片。亚克力立牌在特定高度处打孔,用于固定相机,使

镜头中心与标签中心处于同一水平面。

标签部分使用的是两个 26 cm 的标签并排放置。一侧为边长 24 cm 的大尺寸标签,为便于识别两侧留有 1 cm 宽白色边框。另一侧为分布于九宫格四角的 4 个编号不同的 8 cm 边长的小标签,在 24 cm 边长的九宫格外面同样保留 1 cm 宽白色边框。标签同样被固定于 T 形亚克力立牌上。

中转标签可以被视为标签部分和相机部分的结合体。在标签部分所用 T 型立牌高度特定高度处打孔,将相机与标签以相互背对形式固定。因大尺寸标签一侧不便于固定相机,故将打孔位置横向移动 2 cm,使相机完全固定在小标签所在立牌一侧。此时相机镜头执行与其背后标签中心并不重合,有 3.2 cm 的距离差。故在实际测量时,应对测量结果进行补正。

在实验 4 中,中转标签进行无规律随机低速移动。此时,相机模块和中转标签模块的相机需要同时工作,对数据进行采集处理。但由于存在性能差异,在不同平台上同一个 Apriltags 定位算法执行一次采集-分析循环所用时间并不相同,在数秒的运行后,程序输出的数据将不再能够准确对应。本文采用的解决办法是将实时图像转换为录像后再进行测量。相机不再将采集得到的图像传递到程序中进行处理,而是存储为录像同时通过一件标志性的事件的发生(例如木块掉落)来确保两段录像的同步。

在各组实验中,为确保采集得到的数据准确,待相机回传的图像稳定后,连续采集数秒的图像。取中间的 5 组数据,以其均值作为实验数据。

在采集数据前,首先使用张氏标定法对相机进行标定,在图片尺寸为 1 600×900 时,标定结果如下:

- 1) 焦距: x 轴 1 468.3 mm, y 轴 1 468.6 mm;
- 2) 主点: 横向 944.50 px, 纵向 515.32 px;
- 3) 径向畸变: $k_1 = 0.1886$, $k_2 = -0.7961$;
- 4) 切向畸变: $p_1 = 0$, $p_2 = 0$ 。

3 结果与讨论

3.1 结果

为更加直观地体现实验结论,本文将按照实验顺序进行叙述。在实验 1~5 中,考虑到现实世界存在的部分噪声很难在仿真实验中被模拟,同时进行了仿真实验与真实实验,并将二者的实验数据进行了并列对比,结果为二者虽然在细微变动处有一定差异,但整体变动趋势和所得结论基本一致,可以互相印证,进一步佐证本文所提出方法的正确性与可靠性。

考虑到仿真实验是对真实环境的理想化模拟,且受篇幅所限,本文仅保留少量仿真实验的结果用于与真实

实验的数据结果进行对比,其余用于展示实验结果与佐证实验结论的图像均选用真实实验的实验数据,图 5~20 即为各实验所得结果。

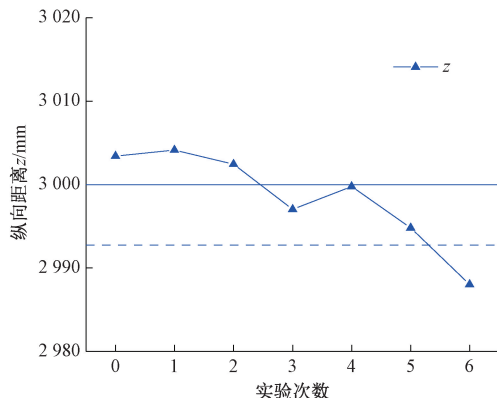


图 5 实验 1(仿真)中计算得到的 z 变量数值

Fig. 5 Values of z variables calculated in experiment 1 (simulation)

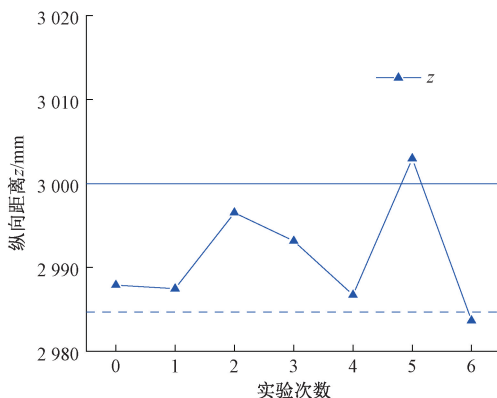


图 6 实验 1(真实)中计算得到的 z 变量数值

Fig. 6 Values of z variables calculated in experiment 1 (real)

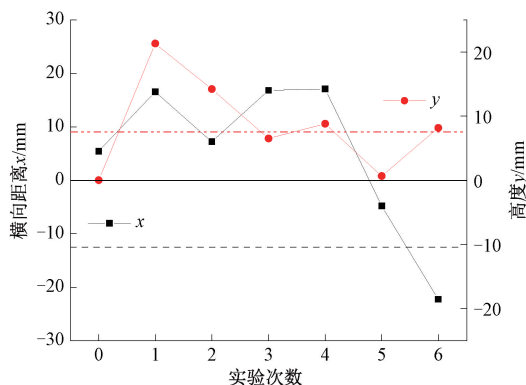


图 7 实验 1 中计算得到的 x 、 y 变量数值

Fig. 7 Values of x and y variables calculated in experiment 1

在各实验中(除实验 4 外),所得实验数据均使用折

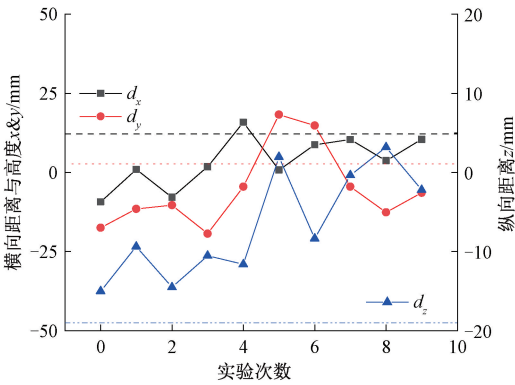


图 8 实验 2 中计算得到的三维坐标测量误差
Fig. 8 3D coordinate measurement error
calculated in experiment 2

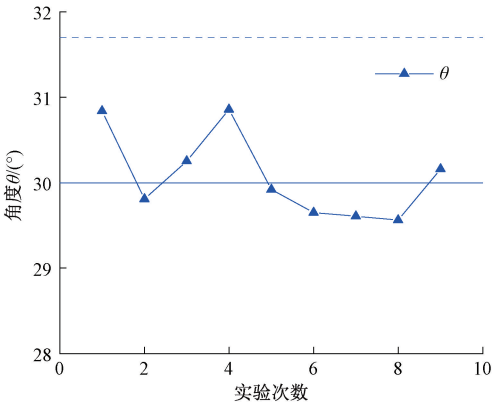


图 9 实验 3 中计算得到的航偏角数值
Fig. 9 Yaw angle values calculated in experiment 3

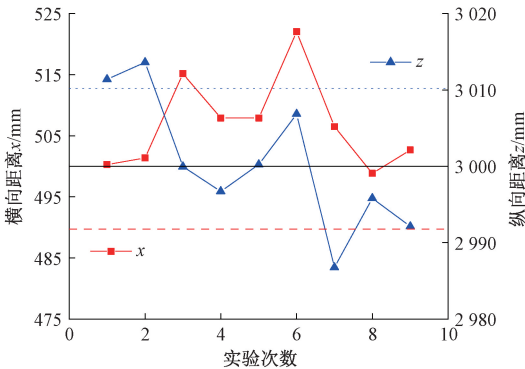


图 10 实验 3 中计算得到的 x, y 变量数值
Fig. 10 Values of x and y variables calculated in experiment 3

线图的形式进行展示。图中虚线表示不使用中转标签只使用相机对标签进行直接测量时得到的测量结果(存在多组变量时对应虚线颜色与变量相同);实线表示标签所在位置与角度的真实值。在实验 4 中,对移动和旋转中的中转标签进行了一段时间的连续抽样测量,结论以压

缩折线图的形式进行表示。图中虚线表示标签在现实空间的真实位置。为便于观察,在共用同一横坐标的基础上,调整纵向坐标范围,使两条曲线上下错开。

由于存在噪声和相机本身微小变动,仿真实验所得数据与真实实验测得数据存在一定出入,但二者依旧存在一些共通之处,由此可以得出如下结论。

1) 计算得到的纵向距离准确度要高于直接测量结果,其代价是计算得到的横向距离和高度信息准确度会低于直接测量结果。

2) 计算得到的方位角略优于直接测得的数据。这可以被归因于随机测量误差与安装机械误差间的抵消。

3) 中转标签与目标标签或测量相机任何一方的距离或方位角过大,均会降低测量准确度。

4) 计算得到的横向距离和高度信息间并无较明显关联之处,无法通过将高度信息强制锚定到固定值的校正方法来实现进一步降低误差。

对实验 1~3 的每个结果计算得到的纵向距离相对测量误差进行统计,并与直接测量得结果进行比较,汇总于表 1。从表 1 中可以看出,原本相对误差在 0.5% 以上的远距离纵向距离测量(折合绝对误差 15 cm),通过使用中转标签进行间接定位,其测量结果能够降至最大相对误差为 0.4%,平均相对误差为 0.05%,绝对测量误差降低 1 dm、相对测量误差降低 0.45%。

表 1 实验 1~3 中测量误差对比

Table 1 Comparison of measurement errors in experiments 1~3 (%)

实验编号	直接测量	平均误差	最小误差	最大误差	低于直接测量的比例/%
实验 1	-0.24	-0.05	-0.01	-0.40	85.7
实验 2	-0.53	<0.01	<0.01	0.11	100
实验 3	1.07	0.04	0.01	0.13	100

在实验 4 中,由于没有进行平均化操作,计算得到的数据存在较大的波动幅度,但总体来说依旧满足上述结论,体现为纵向距离振动幅度较小,横向距离振动幅度较大,如图 11 和 12 所示。

为便于分析,对实验 4 中的数据进行了统计,分别计算各组数据中横向距离与纵向距离的平均数与极值,以及区域(25%,75%)和(2.5%,97.5%)边界位置数据的值,并和直接测量结果一起处理为相对误差,汇总为表 2 和 3。可以看到,在使用相对定位进行间接测量时,仿真实验中全部数据的纵向距离均能低于直接测量结果,即使是测量误差会出现增大的横向误差,也有 51% 低于直接测量结果。在真实实验中,由于噪声与机械误差并没有被完全补正的原因,这一比例低于仿真实验,但仍有 44% 的纵向距离数据低于直接测量结果,在横向距离上这个数据是 20%。

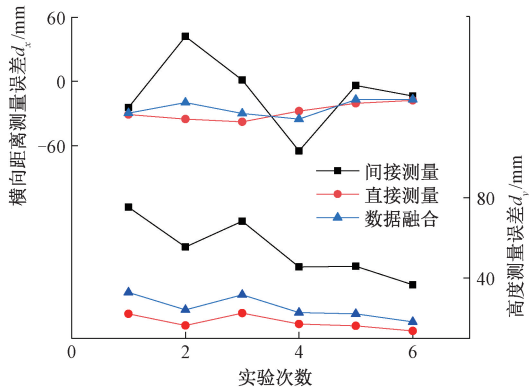


图 13 实验 5 中计算得到的横向距离与高度测量误差

Fig. 13 Lateral distance and height measurement errors calculated in experiment 5

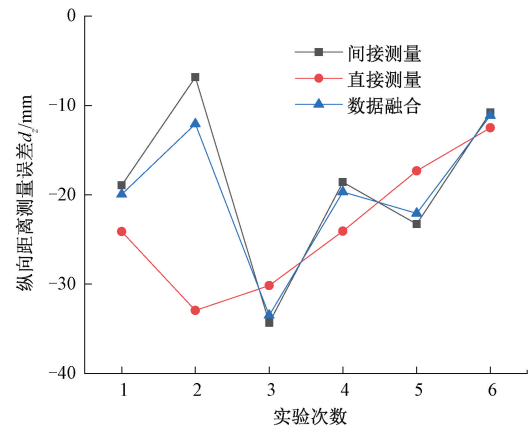


图 14 实验 5 中计算得到的纵向距离测量误差

Fig. 14 Longitudinal distance measurement errors calculated in experiment 5

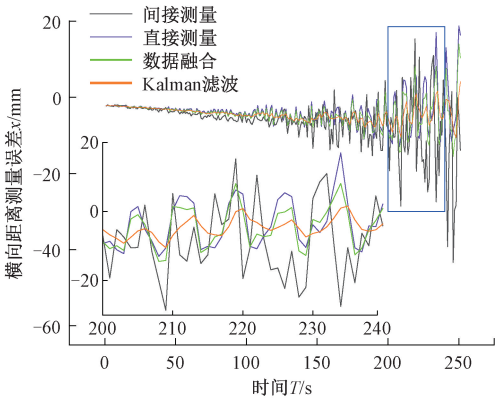


图 15 实验 6 中横向距离测量误差对比 (含局部放大图)

Fig. 15 Comparison of lateral distance measurement errors in experiment 6 (including partial enlarged drawing)

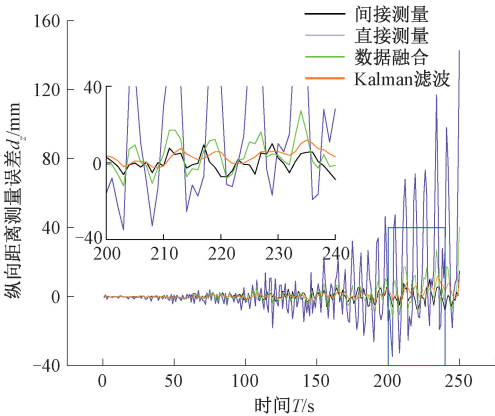


图 16 实验 6 中纵向距离测量误差对比 (含局部放大图)

Fig. 16 Comparison of vertical distance measurement errors in experiment 6 (including partial enlarged drawing)

权数据融合算法合并卡尔曼滤波,进一步降低测量结果的较低合成误差,同时很好地抑制了其波动幅度。这使由于存在较大测量误差而导致测量结果不可信的区域,因测量准确度的显著增加,使得测量结果可信度提升,实现了测量范围的明显拓展。图 15~17 分别为使用 4 种方法测量时的横向距离误差、纵向距离误差与测量合成误差。

由图 15~17 可以发现,在对横向距离和纵向距离进行测量时,间接测量与直接测量分别具有更大的测量误差;通过使用固定权值的加权融合,测量误差得到明显降低;在使用自适应权重合并卡尔曼滤波后,测量误差得到进一步降低。

在图 18 中,本文对比了直接将固定权重的加权结果直接进行卡尔曼滤波和使用自适应权重进行卡尔曼滤波后得到的测量结果的合成误差值对比。由图 18 可以发现,使用自适应权重后,测量合成误差比不使用时有一定

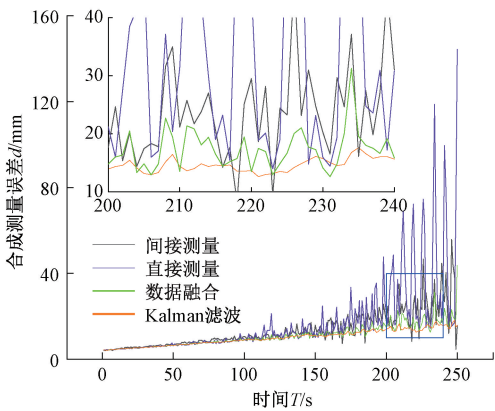


图 17 实验 6 中测量合成误差对比 (含局部放大图)

Fig. 17 Comparison of measurement synthesis errors in experiment 6 (including partial enlarged drawing)

的降低,且对某一测量方法产生的粗大误差有着较好的

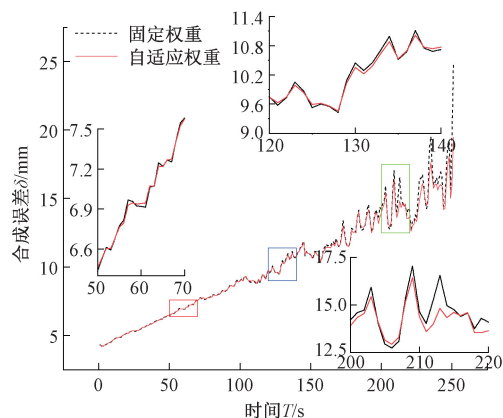


图 18 实验 6 固定权重与自适应权重合成误差对比(含局部放大图)

Fig. 18 Comparison of measurement synthesis error with fixed weight and adaptive weight in experiment 6 (including partial enlarged drawing)

修正能力。这是由于自适应权重可以更加灵活的调整加权重,能够降低偏差较大的一方所占的权重,减小加权结果偏离测量真值的程度。此外,通过设定权重的上下限,且对差值进行一定比例的缩小,使得加权结果不仅是对卡尔曼滤波值的简单跟随,而且是在大方向跟随的前提下具有一定的灵活性,避免因受到模型的桎梏因而在目标运动轨迹发生改变时产生较大的超调。

在实验 7 中,本文对使用多个中转标签的情况进行了仿真实验,实验结果如图 19~20 所示。通过图 19 可以看出,随着标签与相机间间隔的中转标签数增多,测量结果的误差总体呈增大趋势。这是由于误差会随中转标签数量的增加而累计。然而,误差在累计的过程中亦有可能互相抵消,使得测量误差反而减小。该现象在图 19 中亦有体现。图 20 对实验 3 与实验 7 中目标标签的测量误差进行了对比。两次实验的目标标签位置相同,区别在于实验 7 使用了更多的中转标签。从图中可以发现,中转标签数量的增加,会显著增加对目标标签测量时产生的误差。因此,中转标签的数目并非越多越好。

3.2 讨论

在第 1 节中给出了使用中转标签后目标标签的空间位姿计算方法,可以看到,方位角数据的准确度会严重影响最终的测量结果。以仿真实验 2 的第 7 次实验为例,该实验测得的横向距离误差达到 10%。造成该误差的主要原因是测得的中转标签航偏角 θ 产生了 1.5° 的误差。后续计算表明,当该误差缩小至 0.15° 时,测得的横向距离误差减小至 2%。这表明对航偏角 θ 测量引入的误差极大地影响横向距离的测量准确度。由于斜对称性,俯仰角 ψ 引入的误差会带来同样的问题。但滚转角 φ 所引入的误差并不对横向距离带来显著的影响,即使是滚转

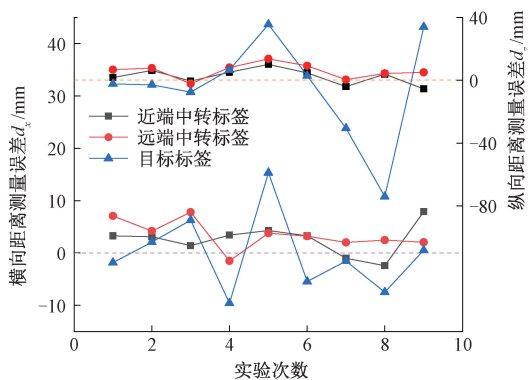


图 19 实验 7 中各标签测量误差纵向对比

Fig. 19 Vertical comparison of measurement errors of each tag in experiment 7

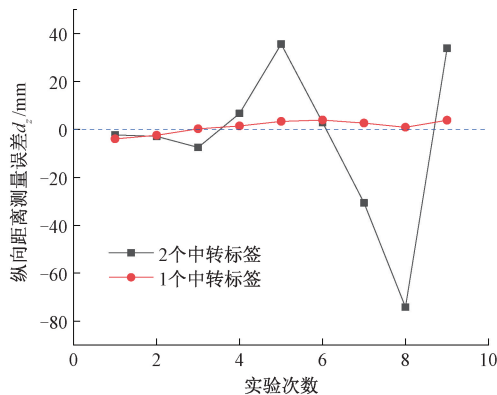


图 20 实验 3 与实验 7 目标标签纵向测量误差对比

Fig. 20 Comparison of longitudinal measurement errors of target tag in experiment 3 and experiment 7

角 φ 产生 10° 的巨大测量误差,在横向距离上也仅带来 1% 的测量误差。由于旋转矩阵自身的特性,方位角的测量误差对纵向距离的影响非常小,这使得该方法对远距离 Apriltags 标签的纵向距离测量十分精准。但若得到比较准确的横向距离与高度,则需要对中转标签的方位角进行准确的测量。

4 结论

在远距离与大方位角时, Apriltags 标签不能提供较好的空间位姿信息,故 Apriltags 标签很少被应用于远距离定位。本文分析了该问题出现的原因,并提出通过引入间接定位,设置中转标签,将长距离转换为多个中短距离叠加的方式解决该问题。在间接定位与直接定位结果同时存在时,通过数据融合的方式结合两种定位方法的优势,实现空间坐标准确度的进一步提升。该方法实现了对 Apriltags 远距离纵向测量准确度的提升和测量距离

的拓展。通过仿真实验与真实实验证明了该方法的可行性,并讨论了该方法存在的一些局限性。

需要注意到,在实际测量中,只能对相机前方一定夹角内的标签进行测量,该夹角受限于相机视场角 θ 。后续研究计划中计划使用间接定位实现对与相机光轴有较大夹角标签的测量,绕过相机视场角的限制,实现大广角范围内的全测量。此外,本文讨论并通过仿真实验分析了存在多个中转过标签时的情况,在未来希望能够通过设计更多实验,对该问题进行进一步分析。

参考文献

- [1] 余铎,王耀南,毛建旭,等. 基于视觉的移动机器人目标跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):227-235.
YU D, WANG Y N, MAO J X, et al. Vision-based object tracking method of mobile robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):227-235.
- [2] 李占旗,高继东,彭凯,等. 基于PnP算法的前方车辆测距方法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12):104-108.
LI ZH Q, GAO J D, PENG K, et al. Method of measurement vehicle distance based on PnP [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(12):104-108.
- [3] 孙龙龙,江明,焦传佳. 基于运动矢量的改进视觉SLAM算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9):23-31.
SUN L L, JIANG M, JIAO CH J. Improved visual SLAM algorithm based on the motion vector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9):23-31.
- [4] 田如安,李筠,杨海马,等. 基于机器视觉的汽车减震杆检测系统[J]. 电子测量技术, 2019, 42(22):103-106.
TIAN R AN, LI J, YANG H M, et al. Automobile buffer detection system based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technique, 2019, 42(22):103-106.
- [5] WANG J, OLSON E. Apriltag 2: Efficient and robust fiducial detection [C]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016: 4193-4198.
- [6] ABBAS S M, ASLAM S, BERNIS K, et al. Analysis and improvements in Apriltag based state estimation [J]. Sensors, 2019, 19(24):5480.
- [7] LIANG X, CHEN G, ZHAO S, et al. Moving target tracking method for unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle heterogeneous system based on Apriltags[J]. Measurement and Control, 2020, 53(3-4):427-440.
- [8] KALAITZAKIS M, CAIN B, CARROLL S, et al. Fiducial markers for pose estimation: Overview, applications and experimental comparison of the artag, Apriltag, aruco and stag markers [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 101: 1-26.
- [9] SHABALINA K, SAGITOV A, SABIROVA L, et al. ARTag, Apriltag and CALTag fiducial systems comparison in a presence of partial rotation: Manual and automated approaches [J]. Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO 2017, 2020, 495: 536-558.
- [10] ZHENGLONG G, QIANG F, QUAN Q. Pose estimation for multicopters based on monocular vision and Apriltag [C]. 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2018: 4717-4722.
- [11] ABHIJITH V S, RAJ A A B. Robot operating system based charging pad detection for multirotors [J]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS 2020), 2020: 1151-1155.
- [12] FAN G, WANG G. Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment[J]. 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 2017: 79-83.
- [13] MANGELSON J G, WOLCOTT R W, OZOG P, et al. Robust visual fiducials for skin-to-skin relative ship pose estimation [C]. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE, 2016: 1-8.
- [14] WHELAN T, GOESELE M, LOVEGROVE S J, et al. Reconstructing scenes with mirror and glass surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 102:1-102:11.
- [15] TANG D, HU T, SHEN L, et al. Apriltag array-aided extrinsic calibration of camera-laser multi-sensor system[J]. Robotics and Biomimetics, 2016, 3:13.
- [16] 何浩楠,陈宇涛,蒋占阳,等. 基于Apriltag的智能小车拓展定位追踪应用[J]. 现代信息科技, 2020, 4(16):24-27.
HE H N, CHEN Y T, JIANG ZH Y, et al. The application of locating and tracking in a smart car based on Apriltag [J]. Modern Information Technology, 2020, 4(16):24-27.
- [17] 安晨亮,高喜天,冀东. 基于Apriltag算法的在线恢复深度的无人机单目SLAM系统[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(5):16-21.
AN CH L, GAO X T, JI D. An UAV monocular SLAM

system with online recovery depth based on Apriltag algorithm [J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(5):16-21.

- [18] 林威, 王琛, 胡良鹏. 基于 Apriltag 的分体式飞行汽车自主导引对接方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6):1-5.

LIN W, WANG CH, HU L P. Research on auto-docking method of split flying vehicle based on Apriltag algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(6):1-5.

- [19] 焦传佳, 江明. 基于 Apriltag 图像识别的移动机器人定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1):110-119.

JIAO CH J, JIANG M. Research on positioning of mobile robot based on low complexity Apriltag image recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1):110-119.

- [20] 贾配洋, 彭晓东, 沈菲菲, 等. 基于 Apriltags 改进算法的无人机移动目标识别与跟踪[J]. 电子设计工程, 2017, 25(17):31-35.

JIA P Y, PENG X D, SHEN F F, et al. UAV's moving target recognition and tracking based on improved Apriltags algorithm [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(17):31-35.

作者简介



陈曼桐, 2019 年于天津大学获得学士学位, 现为燕山大学硕士研究生, 主要研究方向为车辆跟踪定位。

E-mail: zuitaping@126.com

Chen Mantong received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in Yanshan University. His main research interests include vehicle tracking and positioning.



侯培国(通信作者), 1990 年于东北重型机械学院获得学士学位, 1993 年于东北重型机械学院获得硕士学位, 2003 年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学教授, 主要研究方向为光电检测、智能检测、智能仪器研究与设计。

E-mail: pghou@ysu.edu.cn

Hou Peiguo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeast Heavy Machinery Institute in 1990, M. Sc. degree from Northeast Heavy Machinery Institute in 1993, and Ph. D. degree from Yanshan University in 2003, respectively. Now he is a professor at Yanshan University. His main research interests include photoelectric detection, intelligent detection, intelligent instrument research and design.