

基于单目视觉的室内微型飞行器位姿估计与环境构建

郭力 昂海松 郑祥明

(南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京, 210016)

摘要:针对微型飞行器(Micro air vehicle, MAV)在室内飞行过程中无法获得GPS信号,而微型惯性单元(Inertial measurement unit, IMU)的陀螺仪和加速度计随机漂移误差较大,提出一种利用单目视觉估计微型飞行器位姿并构建室内环境的方法。在机载单目摄像机拍摄的序列图像中引入一种基于生物视觉的方法获得匹配特征点,并由五点算法获得帧间摄像机运动参数和特征点位置参数的初始解;利用平面关系将特征点的位置信息由三维降低到二维,给出一种局部优化方法求解摄像机运动参数和特征点位置参数的最大似然估计,提高位姿估计和环境构建的精度。最后通过扩展卡尔曼滤波方法融合IMU传感器和单目视觉测量信息解算出微型飞行器的位姿。实验结果表明,该方法能够实时可靠地估计微型飞行器的位置和姿态,构建的环境信息满足导航需求,适用于微型飞行器室内环境中的导航控制。

关键词:微型飞行器;生物视觉;维数降低;局部优化;位姿估计;环境构建

中图分类号: V249.122

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)02-0165-07

Monocular Vision Based Motion Estimation of Indoor Micro Air Vehicles and Structure Recovery

Guo Li, Ang Haisong, Zheng Xiangming

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Micro air vehicles (MAVs) need reliable attitude and position information in indoor environment. The measurements of onboard inertial measurement unit (IMU) sensors such as gyros and accelerometers are corrupted by large accumulated errors, and GPS signal is unavailable in such situation. Therefore, a monocular vision based indoor MAV motion estimation and structure recovery method is presented. Firstly, the features are tracked by biological vision based matching algorithm through the image sequence, and the motion of camera is estimated by the five-point algorithm. In the indoor environment, the planar relationship is used to reduce the feature point dimensions from three to two. Then, these parameters are optimized by an local strategy to improve the motion estimation and structure recovery accuracy. The measurements of IMU sensors and vision module are fused with extended Kalman filter. The attitude and position information of MAVs is estimated. The experiment shows that the method can reliably estimate the indoor motion of MAV in real-time, and the recovered environment information can be used for navigation of MAVs.

Key words: micro air vehicle; biological vision; dimensionality reduction; local optimization; motion estimation; environment recovery

基金项目:国家自然科学基金(60804058)资助项目;江苏省自然科学基金(SBK201022724)资助项目。

收稿日期: 2011-06-21; **修订日期:** 2012-01-09

通讯作者: 昂海松,男,教授,博士生导师,1947年2月生, E-mail: ahs@nuaa.edu.cn。

无人机微型化后,飞行空间扩大到城市甚至建筑物内。由于遮挡、噪声干扰等原因,室内环境中的 GPS 信号十分不稳定,无法得到准确的定位信息,同时微型惯性单元(Inertial measurement unit, IMU)传感器长时间使用往往存在较大的积累误差,无法独立准确地提供位姿信息。微型飞行器(Micro air vehicles, MAV)实用化的关键技术是自主飞行,姿态和位置的检测作为位姿稳定控制的前提在 MAV 自主飞行中起关键作用^[1]。视觉系统具有独立性、准确性、可靠性以及信息完整性等优势,利用视觉系统对飞行器的位姿进行估计是近年来发展起来的一种先进的位姿估计方法。而 MAV 尺寸小、重量轻、耗能少,对负载的要求非常严格,机载摄像机作为 MAV 必备任务载荷,使用其估计位姿不增加额外的重量,同时图像中包含的环境信息也能很好地辅助 MAV 室内导航飞行。

室外环境中的利用视觉估计 MAV 位姿的方法主要是从图像中提取地平线,通过对直线信息分析得到飞行器的姿态^[2]。这种方法要求飞行器获取的图像中必须有天空和地面,并且两部分的特征必须十分明显,算法受环境制约,同时该方法只能估计飞行器的俯仰角和滚转角。Celik 提出了一种利用结构化环境中直线信息估计飞行器位姿的单目视觉方法,用于实现 MAV 室内环境中的导航^[3]。该方法要求机载摄像机能够稳定捕捉墙壁与地面的交线,而当室内环境较复杂时,该方法就无法辅助飞行器导航。Achtelik 利用四旋翼 MAV 上安装的双目摄像机和激光扫描雷达进行位姿估计和室内环境感知^[4],然而双目摄像机和激光扫描雷达的重量和功耗严重制约了飞行器的航时和航程。

为了满足 MAV 在非结构化室内环境中导航的需求和负载限制,本文提出了一种基于单目视觉的 MAV 位姿估计和环境构建方法。首先引入基于生物视觉的特征匹配用于稳定跟踪图像特征点,再根据五点算法获得帧间摄像机的运动参数和特征点的位置信息;结合室内环境中的平面关系,将特征点位置参数的维度由三维降低为二维,减少优化迭代过程中的参数数量;将降维后的初始解代入局部优化方法求得最大似然估计,提高位姿估计和环境构建的精度。其次,通过卡尔曼滤波方法融合 IMU 传感器测量数据和单目视觉估计信息求解出 MAV 的位置和姿态。最后给出实验结果,总结本文方法。

1 特征提取与匹配

在非结构化的室内环境中特征提取与匹配方

法要求满足:特征的数量要足够多以保证位姿估计与环境构建的精度;特征要比较明显便于在图像序列中稳定的匹配跟踪;计算量要小,以满足实时性的需要。根据以上特点,本文采用以下方法提取与匹配图像中的特征。

1.1 特征点提取

特征点通常指灰度变化剧烈的点。选择合适的特征点有助于提高匹配的可靠性和精度。考虑到 MAV 平台的噪声图像和实时性要求,本文选择 Harris 角点作为特征点^[5],并经过非最大值抑制处理,避免特征点集中于图像某局部区域。

1.2 基于生物视觉的匹配

MAV 在室内飞行,背景较复杂,存在光照和噪声影响,相邻两帧图像特征点的匹配较为困难。图像之间除了平移运动,还有旋转、缩放运动,如果采用传统的互相关匹配,将带来较大的误差,采用光流方法,则实时性较差。

本文采用基于生物视觉的匹配方法对图像帧间特征点进行匹配^[6]。生物学试验研究得知,灵长类动物通过视觉皮层上超柱处理图像,而图像在超柱中被超柱向量所描述。超柱向量是视觉信息的重要提取,使数据量大大降低,并保留了一定空间频率段的信息,排除了空间高频和低频成分附加的亮度变化。采用 Gabor 小波对图像进行变化就能得到描述图像信息的超柱向量。Gabor 函数的形式为

$$G^i(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\exp\left(-\frac{x_1^2}{\sigma_x}-\frac{y_1^2}{\sigma_y}+i\omega x_1\right) \tag{1}$$

$$\begin{cases} x_1=x\cos\theta+y\sin\theta \\ y_1=-x\sin\theta+y\cos\theta \end{cases} \tag{2}$$

式中: σ_x 和 σ_y 为尺度参数; ω 为频率参数; θ 确定了 Gabor 函数的朝向;通过改变各参数得到不同的 Gabor 函数,可以用一组 $G^i(x,y)$ 模板作为一个超柱,其中 $i=1,2,\cdots,n$ 。一幅图像分别与这 n 个模板作内积,即可得到一个 n 维的超柱向量。这个超柱向量可以用来表示图像的所有信息。

本文引入二维相似模型作为图像非线性变换关系的近似。相邻帧图像二维相似模型为

$$p'=s\cdot R p+t \tag{3}$$

式中: p' 和 p 为图像点坐标; s 为变焦系数; R 为二维相似旋转变换矩阵; t 为图像二维平移量。采用算子的方式来描述相邻两帧图像间的关系

$$f_i(p')=A(\rho)\circ f_{i-1}(p) \tag{4}$$

式中: $A(\rho)$ 为变换二维相似变换算子; ρ 为 4 个变换参数。通过图像与 Gabor 函数内积得到超柱向量为

$$\{\langle G^i | f \rangle\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

以超柱向量间的欧式距离作为匹配准则,通过最小化距离得到变换参数,实现特征点的匹配。

基于生物视觉的特征点匹配方法有以下优点:匹配不需要高对比度和明显的特征点,对低频背景变化和高频噪声不敏感;减少了数据处理量,实时性较好。由于室内环境的复杂性,而且生物视觉匹配采用的二维相似模型只是帧间图像变换的近似,因此在此基础上大幅度减小搜索空间,利用互相关方法完成特征点的精确匹配。

2 运动估计与环境构建

由序列图像估计摄像机运动并重建环境是计算机视觉领域里一个热门的研究内容。为将其应用到MAV室内环境自主导航飞行中,本文首先进行帧间摄像机运动的初步估计,然后利用特征点间的平面关系降低其位置参数维度,并通过局部优化策略获得摄像机运动参数和特征点位置参数的最优解,从而在保证运动估计和环境构建精度的同时,提高算法实时性。

2.1 摄像机标定

为使机载单目摄像机能够在MAV室内长时间导航飞行中稳定跟踪图像特征点,需要加装广角镜头。为避免在光束平差方法中增加优化参数,摄像机内参数需要在地面准备阶段完成标定。根据文献[7]的方法,利用棋盘格对摄像机内参数进行离线式标定。广角镜头的变形主要为径向畸变,由FOV模型^[8]消除畸变影响,如图1所示。

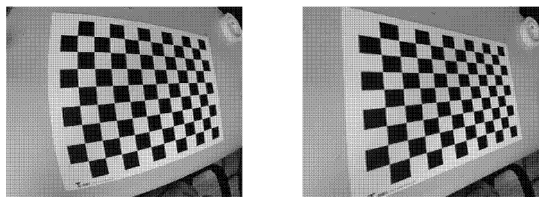


图1 消除广角镜头畸变

2.2 相对定向

根据两帧图像间的特征对应估计摄像机位姿和场景结构称为相对定向。假设 \mathbf{p}, \mathbf{p}' 为两帧图像上的对应点(经内参数矩阵 \mathbf{K} 和镜头畸变参数 \mathbf{d} 归一化后的对应点图像坐标),则满足以下关系

$$\mathbf{p}'^T \mathbf{E} \mathbf{p} = 0 \quad (6)$$

式中 \mathbf{E} 为本质矩阵,求解出本质矩阵就能够估计出两帧图像间摄像机的相对运动。根据本质矩阵的两个约束条件

$$\begin{cases} \det(\mathbf{E}) = 0 \\ \mathbf{E} \mathbf{E}^T \mathbf{E} - \frac{1}{2} \text{trace}(\mathbf{E} \mathbf{E}^T) \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

当两帧图像间存在5对或者更多特征对应时,可以得到一个多项式方程组。Nister采用Gauss-Jordan消元法对这个多项式方程组进行求解,获得本质矩阵的所有可能解^[9]。结合RANSAC算法计算特征点的反投影误差得到本质矩阵的唯一解,并消除误匹配带来的影响。

若 \mathbf{E} 的奇异值分解为 $\mathbf{U} \text{diag}(1, 1, 0) \mathbf{V}^T$,则两帧图像间的摄像机相对运动变换矩阵可求得

$$[\mathbf{R} | \mathbf{t}] = \begin{cases} [\mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^T | \mathbf{u}_3] \\ [\mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^T | -\mathbf{u}_3] \\ [\mathbf{U} \mathbf{W}^T \mathbf{V}^T | \mathbf{u}_3] \\ [\mathbf{U} \mathbf{W}^T \mathbf{V}^T | -\mathbf{u}_3] \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{u}_3 为 \mathbf{U} 的最后一列; $\mathbf{W} = [0, -1, 0; 1, 0, 0; 0, 0, 1]$ 。根据点在摄像机前方的原理,可以从以上4个解中确定正确解,由此估计出两帧图像间摄像机相对运动的旋转矩阵和平移矢量。其中平移矢量为归一化矢量只表示相对位移的方向。如果要得到平移量的大小,需要在MAV准备阶段利用标定棋盘格或者激光测距雷达初始化平移量的尺度因子。

2.3 降低维数

相对定向中根据相邻两帧图像的特征对应求得本质矩阵,从而估计出摄像机的运动参数,通过三角测量法获得特征点的三维位置信息。然而这样求得的运动参数和三维点位置并不精确,需要将其作为初始参数传递给优化算法,以获得这些参数的最大似然估计。因此,MAV室内环境下的位姿估计和环境构建方法计算速度将依赖于待估计参数的数目。考虑到室内环境中存在平面关系,本文将特征点位置参数的维数由三维降低为二维,从而减小最优化参数估计的运算量。

2.3.1 平面表示

室内环境中存在平面结构,很多特征点就位于这些平面上。利用特征点间的平面关系能够减少环境特征中的冗余信息,达到降低维数的目的。本文采用7个参数来描述一个空间平面 $\pi_i = [\mu_i, \alpha_{1i}, \beta_{1i}, \alpha_{2i}, \beta_{2i}]$,其中 μ_i 为组成这个平面的特征点均值,平面的方向则由两个位于该平面上的基矢量表示 $\mathbf{v}(\alpha_{1i}, \beta_{1i}), \mathbf{v}(\alpha_{2i}, \beta_{2i})$ 。

$$\mathbf{v}(\alpha, \beta) = [\cos \alpha \sin \beta, -\sin \alpha, \cos \alpha \cos \beta]^T \quad (9)$$

平面的法向矢量可由两个基矢量的叉积求得。位于该平面上的三维特征点则可表示为

$$\mathbf{P}_j^{\text{new}} = [(\mathbf{P}_j - \mu_i) \cdot \mathbf{v}(\alpha_{1i}, \beta_{1i}), (\mathbf{P}_j - \mu_i) \cdot$$

$$v(\alpha_{2i}, \beta_{2i})]^T \tag{10}$$

从式(10)可以看出,位于平面 π_i 上的 m 个特征点其位置参数个数由原来的 $3m$ 减少到 $7+2m$ 。

2.3.2 k 均值聚类

计算位于平面 π 上均值去除特征点集 \mathbf{P}_μ 的主元即可求得该平面的法向矢量。对 \mathbf{P}_μ 的协方差矩阵 \mathbf{C} 进行奇异值分解

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \tag{11}$$

式中: \mathbf{V} 的行向量即为该平面的主元; $\mathbf{\Sigma}$ 为奇异值矩阵。

为了从单目摄像机获取的特征点集中提取平面结构,这里采用迭代 k 均值聚类算法。 k 均值聚类算法将 n 个特征点划分为 k 个平面聚类,使其满足同一平面聚类中特征点相似度较高,不同聚类中的特征点相似度较小。其聚类相似度由各平面聚类中特征点均值所获得的中心对象来计算。

平面相似测度函数由聚类特征点集主元对应的均方差比值来表示

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^{i=2} \Sigma(i,i)}{\sum_{i=1}^{i=3} \Sigma(j,j)} \tag{12}$$

对于理想平面上的特征点集 κ 为1。

平面 k 均值聚类的具体步骤:

(1)初始值 $k=1$,所有特征点集作为一个聚类,计算聚类中心 μ 和相似测度值 κ 。

(2)迭代计算,如果某一聚类相似测度值 κ_i 大于阈值 τ_κ ,则标记为一个平面聚类。否则,将该聚类中心 μ_i 沿第一主元方向分裂为两个新的聚类中心,并重新计算相似测度。

(3)当所有聚类都满足平面相似度测定或者 k 值大于预先设定的最大迭代次数时, k 均值聚类过程结束。

当平面聚类完成之后,所有位于平面上的特征点按式(10)降低维数表示,而未被聚类的特征点仍采用原来的三维坐标。

2.4 局部优化策略

假定给定序列图像中观测到的特征对应点集的位置坐标初始估计以及每帧图像摄像机运动参数的初始估计,如果图像噪声满足零均值正态分布,需要一种优化算法求取参数的最大似然估计。为了满足MAV实时性需要,本文给出一种局部优化策略,用以优化估计摄像机运动参数和室内环境结构。

局部优化法采用 Levenberg-Marquardt 算法^[10-11]来最小化代价函数 $\epsilon^i(\zeta^i, \eta^i)$ 。其中 ζ^i 为摄像

机运动参数 $\zeta^i = \{\mathbf{C}^{i-n+1}, \dots, \mathbf{C}^i\}$, η^i 为摄像机 ζ^i 捕捉到的所有特征点位置参数。代价函数的具体形式为

$$\epsilon^i(\zeta^i, \eta^i) = \sum_{\mathbf{c}^k \in \{\mathbf{c}^{i-N+1} \dots \mathbf{c}^i\}} \sum_{\mathbf{p}_j \in \eta^i} \|d^2(\mathbf{p}_j^k, \mathbf{C}^k \mathbf{p}_j)\|^2 \tag{13}$$

式中: $d^2(\mathbf{p}, \mathbf{C}^k \mathbf{P})$ 为特征点 \mathbf{P} 在摄像机 \mathbf{C}^k 上的反投影误差。从式(13)可以看出,在 i 时刻局部光束平差法中优化的摄像机参数只取当前时刻的前 n 个摄像机。而这 n 个摄像机所获取的所有特征点 η^i 会出现在前 M 帧图像中($M > n$),为了减少计算量,这里取前 N 帧图像对应的摄像机参数用于计算反投影误差,其中 $n < N \leq M$ 。MAV的飞行速度不同将会影响 M 的变化,为保证计算精度和算法实时性,本文给出一个 n 和 N 的取值方式

$$\begin{cases} n = 3, N = 5 & v_{\text{MAV}} \leq v_{\text{thresh}} \\ n = 5, N = M & v_{\text{MAV}} > v_{\text{thresh}}, M \leq 10 \\ n = 5, N = 10 & v_{\text{MAV}} > v_{\text{thresh}}, M > 10 \end{cases} \tag{14}$$

式中: v_{MAV} 为微型飞行器的速度; v_{thresh} 为速度阈值。

在飞行器起飞初始阶段采用全局优化算法,以保证后续时刻局部优化策略的位姿估计和环境构建精度。

3 MAV 位姿融合

具有自主飞行能力的MAV安装有IMU传感器包括微型陀螺仪和微型加速度计。通过陀螺仪测量的角速率积分和加速度计测量的线加速度积分能够获得飞行器的姿态和位置信息。由于噪声影响,随着时间流逝,IMU测量的飞行器位姿会产生累积误差。本文采用卡尔曼滤波方法将IMU模块与视觉模块测量的位姿进行融合,提高微型飞行器姿态和位置估计的精度。

3.1 系统状态方程

结合IMU传感器的噪声状况,建立系统模型,其状态方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{w}(k)) \tag{15}$$

式中:状态量 $\mathbf{x}(k) = [\mathbf{r}^n(k) \quad \mathbf{v}^n(k) \quad \mathbf{a}^n(k) \quad \mathbf{\Psi}^n(k) \quad \mathbf{\omega}^n(k)]^T$,分别为MAV的位置、速度和姿态欧拉角向量,上标“n”表示北东地惯性坐标系;输入向量 $\mathbf{u}(k)$ 为机体坐标系下加速度计测量值 $\mathbf{a}^b(k)$ 和陀螺仪测量值 $\mathbf{\omega}^b(k)$,上标“b”表示机体坐标系; $\mathbf{w}(k) = [\delta \mathbf{a}^b(k) \quad \delta \mathbf{\omega}^b(k)]^T$,为测量值的零均值高斯误差。状态方程的具体形式为

$$\mathbf{x}(k+1) =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}^n(k) + \mathbf{v}^n(k+1)\Delta t \\ \mathbf{v}^n(k) + [\mathbf{C}_b^n(k)(\mathbf{a}^b(k) + \delta\mathbf{a}^b(k)) + \mathbf{g}^n]\Delta t \\ \mathbf{\Psi}^n(k) + \mathbf{E}_b^n(k)[\omega^b(k) + \delta\omega^b(k)]\Delta t \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{C}_b^n(k)$ 为机体系到惯性系变换的方向余弦矩阵; $\mathbf{E}_b^n(k)$ 为机体测量旋转速率到惯性系欧拉角速率的变换矩阵

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ s_\varphi s_\theta c_\psi - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi c_\theta \\ c_\varphi s_\theta c_\psi + s_\varphi s_\psi & c_\varphi s_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi c_\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{E}_b^n = \begin{bmatrix} 1 & s_\varphi t_\theta & c_\varphi t_\theta \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi/c_\theta & c_\varphi/c_\theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $s_\theta = \sin\theta$; $c_\theta = \cos\theta$; $t_\theta = \tan\theta$; θ, φ, ψ 分别表示 MAV 的俯仰角、滚转角、偏航角。

3.2 系统量测方程

由单目视觉系统估计的摄像机位姿作为量测值更新系统,量测方法为

$$\mathbf{z} = h(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (19)$$

式中: \mathbf{z} 为单目视觉估计的摄像机位置和姿态; \mathbf{x} 为系统状态量; \mathbf{v} 为量测方程零均值高斯误差。将摄像机安装在 MAV 的重心位置简化坐标变换关系。量测方程的具体形式为

$$\mathbf{r}^c = \mathbf{C}_b^c \mathbf{C}_n^b \mathbf{r}^n + \mathbf{v}_r \quad (20)$$

$$\mathbf{\Psi}^c = \mathbf{E}_b^c \mathbf{E}_n^b \mathbf{\Psi}^n + \mathbf{v}_\Psi \quad (21)$$

式中: \mathbf{r}^c 和 $\mathbf{\Psi}^c$ 为视觉模块估计出的摄像机位置和姿态; \mathbf{C}_b^c 和 \mathbf{C}_n^b 分别为机体系到摄像机系变换的方向余弦矩阵和惯性系到机体系变换的方向余弦矩阵; \mathbf{E}_b^c 和 \mathbf{E}_n^b 为机体系到摄像机系角度变换矩阵和惯性系到机体系角度变换矩阵。 \mathbf{C}_b^c 和 \mathbf{E}_b^c 可由摄像机在 MAV 上的安装方式获得。

4 实验结果

室内飞行的 MAV 平台采用自行研制的四旋翼 MAV,图像数据由无线传输模块传送至地面站处理(CPU 四核 2.66 GHz,内存 4 GB)。实验设备包括:四旋翼 MAV、机载 IMU 传感器系统和单目摄像机系统,如图 2 所示。

本文采用基于生物视觉的匹配算法对图像特

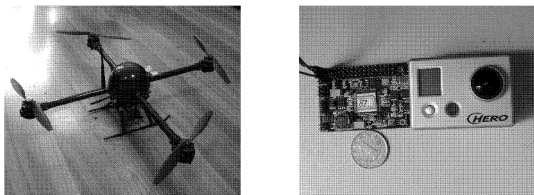


图2 实验设备

征点进行稳定跟踪,图像帧分辨率为 320×240 。序列图像中的三帧特征点提取与匹配跟踪结果如图 3 所示。十字标志为提取的特征点。

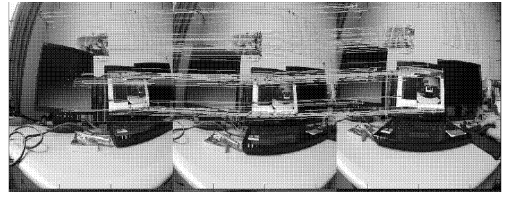
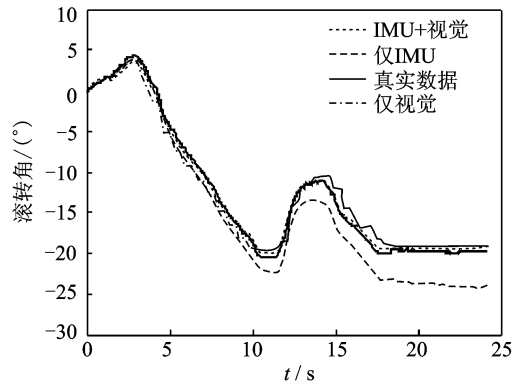
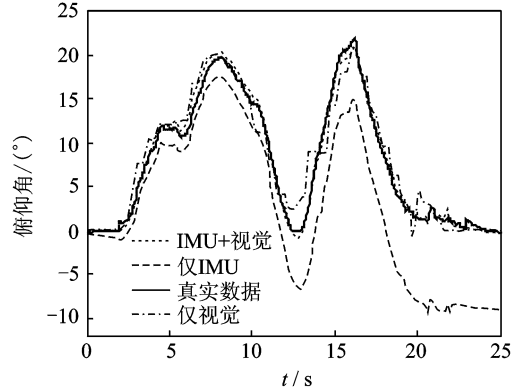


图3 特征提取与匹配结果

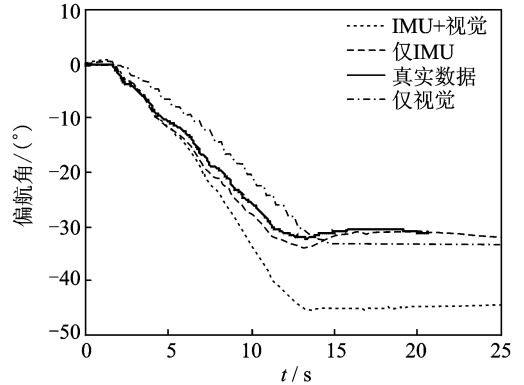
为了提供参考,设计两种方式分别验证姿态估计和位置估计的精度。首先,将 MAV 固定在三轴转台上,绕着 3 个轴分别运动,可以获得 MAV 滚转角、俯仰角和偏航角的参考曲线,如图 4 所示。第



(a) 滚转角曲线



(b) 俯仰角曲线



(c) 偏航角曲线

图4 MAV 姿态曲线

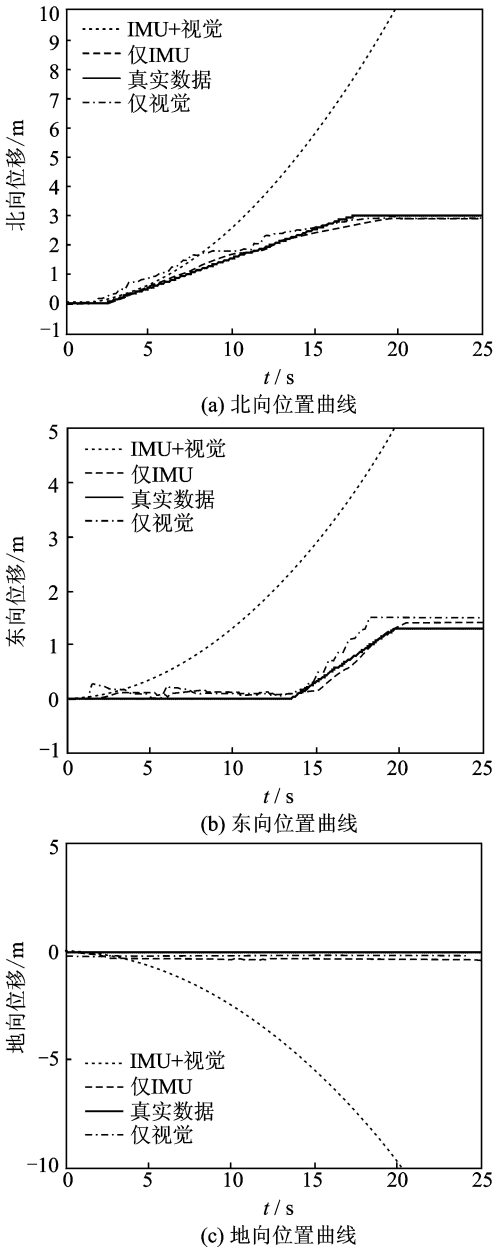


图5 MAV位移曲线

2 种方式将 MAV 固定在地面轮式小车上,车上安装的里程计用于提供东向和北向的位置参考曲线。由于小车做二维平面运动,则高度方向保持不变,如图 5 所示。视觉模块位姿更新频率为 1 Hz,IMU 模块更新频率为 50 Hz。

从图中可以看出,微型陀螺仪和加速度计测量因噪声影响会随时间变化产生累积误差。特别是加速计,其发散速度相当快,这也是室内环境下无 GPS 信号无法准确估计 MAV 位置的主要原因。图 4,5 中的仅视觉曲线为单目视觉单独测量得到的姿态角和位置曲线,其测量值漂移较小,但更新频率较低,曲线呈锯齿状,角度测量的最大误差在 5°左右,位置测量的最大误差在 0.5 m 以内。仅 IMU

的曲线为 IMU 单独测量的姿态角和位置曲线,其更新频率较高,但漂移较快,25 s 内角度漂移最大至 10°以上,而位置漂移更快,20 s 时刻最大漂移已经超过 10 m。因此,加上单目摄像机以后,利用卡尔曼滤波器融合视觉模块和 IMU 模块的测量值能够较好地消除累积误差的影响,同时姿态角估计误差在 1.5°以内,位置估值误差在 0.2 m 以内。卡尔曼滤波中 IMU 系统模型协方差矩阵 Q 和视觉量测更新协方差矩阵 R 分别取值如下

$$\begin{aligned} Q_{TE} &= Q_{TN} = Q_{TD} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \\ Q_{pitch} &= Q_{yaw} = Q_{roll} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix} \\ Q &= \begin{bmatrix} Q_{TE} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & Q_{TN} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & Q_{TD} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & Q_{pitch} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & Q_{yaw} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & Q_{roll} \end{bmatrix} \\ R &= \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

从图 4,5 可以看出,当四旋翼 MAV 在室内运动时,视觉模块加 IMU 模块估计的位姿精度能够满足其自主飞行控制的需要。

视觉模块的更新速度对于 MAV 的位姿估计十分重要,如果不满足实时性要求,则无法应用到室内飞行环境中。图 6 给出了本文算法处理每帧图像的最大计算时间,其中 k 均值聚类的迭代次数阈值取 5,每帧处理的特征点数控制在 1 000 个点。

从图 6 可以看出,由于室内环境存在平面结构,

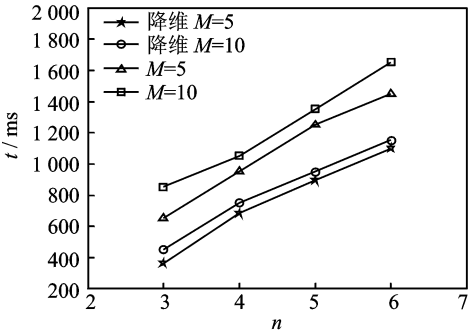


图6 计算时间对比图

当采用参数降维的方法时可以将视觉模块的更新时间控制1 s以内,达到1 Hz的更新频率。如果不进行降维,虽然 $n=3$ 时算法也能达到1 Hz的更新频率,但当MAV速度较快时,为保证结构重建的精度,需将 n 调整为5,此时更新频率就无法满足要求。

图7为手动控制四旋翼MAV在室内飞行时对局部环境的重建结果。整个飞行过程持续2 min,飞行速度保持在0.3 km/h。实线为MAV在室内飞行的轨迹,其他点为视觉模块重建的特征点三维位置坐标。从图中可以看出,重建的环境能够提供给MAV导航系统,实现其室内自主导航。



图7 环境重建结果

5 结束语

由于室内环境中无法获得GPS信号,MAV仅靠机载的IMU传感器不能获得精确的位姿估计,必须依靠其他传感器提供额外的位姿信息。考虑到MAV的载荷限制,本文对基于单目视觉室内MAV的位姿估计方法进行了研究,并重建了环境的三维结构。基于生物视觉的特征点匹配算法,能够快速有效地提高匹配精度;考虑到室内环境中的平面关系,对特征点的位置参数进行降维,以减小算法运算量。局部优化策略的使用则在保证了算法实时性的同时,提高了视觉模块位姿估计和环境重建精度。通过融合IMU传感器和单目视觉模块测量的位姿信息,消除了IMU传感器的累积误差,获得有效可靠的飞行器位姿信息。环境重建的结果不仅能够满足侦查的需要,也能提供给导航模块,从而实现MAV室内环境中的自主导航。

参考文献:

[1] 郑祥明,昂海松. 基于多传感器技术的微型飞行器智能组合导航技术研究[J]. 宇航学报,2006,28(5):1185-1190.
Zheng Xiangming, Ang Haisong. Research on multi-

sensor technique based intelligent integrated navigation for MAV[J]. Journal of Astronautics, 2006, 28(5):1185-1190.

[2] 赵世峰,张海,范耀祖. 一种基于计算机视觉的飞行器姿态估计算法[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(8):885-888.
Zhao Shifeng, Zhang Ha, Fan Yaozu. Attitude estimation method for flight vehicles based on computer vision[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8):885-888.

[3] Celik K, Chung SoonJo. Monocular vision SLAM for indoor aerial vehicles[C]//Intelligent Robots and Systems. St. Louis:IEEE, 2009:1566-1573.

[4] Achtelik M, Bachrach A, He R, et al. Autonomous navigation and exploration of a quadrotor helicopter in GPS-denied indoor environments[EB/OL]. [2009-07]. <http://iarc.angel-strik.com/symposium>, 2009.

[5] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, UK:University of Manchester, 1988:147-151.

[6] 朱宏伟,于起峰. 基于生物视觉的地面目标识别与跟踪锁定[J]. 红外与激光工程,2007,36(6):977-979;955.
Zhu Xianwei, Yu Qifeng. Ground target recognition and tracking based on biological vision[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6):977-979;955.

[7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.

[8] Devernay F, Faugeras D. Straight lines have to be straight: Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments[J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13(1):14-24.

[9] Nister D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2004,26(6):756-770.

[10] Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares [J]. Quarterly Journal of Applied Mathematics, 1944, II(2):164-168.

[11] Marquardt D. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1963, 11(2):431-441.