

基于视觉的无人机飞行过程定位算法研究

马园, 吴爱国, 杜春燕
(天津大学电气与自动化学院, 天津 300072)

摘要: 为了提升无人机飞行过程中的定位精度, 以及使无人机正常飞行于全球定位系统(GPS)信号受到干扰或是失效的环境中, 提出了基于机器视觉的无人机飞行过程中的定位算法。首先, 基于尺度不变特征转换(SIFT)和KD-Tree搜索的图像匹配算法以及各坐标系之间的变换关系得到改进的坐标变换算法Trf1和Trf2, 算法Trf1可求出目标匹配点的地面坐标, 即建立无人机飞行环境地图, 算法Trf2可计算出无人机实时位置; 然后, 在无人机飞行过程中利用算法Trf1和Trf2得出定位算法, 并设计实验。实验表明, 利用该算法计算出的无人机实时位置误差保持在12 cm的范围内, 从而验证了算法的准确性。

关键词: 无人机; SIFT算法; 坐标变换算法; 机器视觉; 飞行过程定位算法

中图分类号: V279; TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)11-0042-05

Vision Based Localization Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles in Flight

MA Yuan, WU Aiguo, DU Chunyan
(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the localization accuracy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in flight, a localization algorithm is proposed based on machine vision. This algorithm can make UAV fly in the environment where Global Positioning System (GPS) signal is disturbed or is in failure. First of all, two modified coordinate transformation algorithms, Trf1 and Trf2, were obtained based on Scale-Invariant Feature Transform (SIFT), KD-Tree search image matching algorithm and the transformation between coordinate systems. With the help of Trf1, the first coordinate transformation algorithm, ground coordinates of the target matched points were calculated out to build up a map of the flight environment. The second algorithm, Trf2, could calculate the real-time locations of UAV. Subsequently, the localization algorithm in UAV flight was obtained based on the two modified coordinate transformation algorithms, and experiment was carried out based on the algorithms. Experiment results show that errors of calculated UAV positions are within 12 cm, which demonstrates the accuracy of this method.

Key words: UAV; SIFT algorithm; coordinate transformation algorithm; machine vision; localization algorithm in flight

0 引言

由于无人直升机具有垂直起飞降落、悬停、横飞、倒飞、慢速巡航以及超低空飞行等多种飞行方式^[1]上的优势, 近年来, 对它的研究呈快速发展趋势。除了在军事侦察、作战等方面的应用, 其在危险环境(如火灾

或地震灾害现场)中的搜查和救援等与人类生活息息相关的领域也得到了广泛的应用和发展^[2]。大多数的无人机用GPS系统作为导航系统^[3], 但GPS系统的定位精度通常在10 m左右, 高精度GPS的成本较高, 而且在某些环境(如室内或隧道)中GPS信号受到干扰而失效, 因此视觉辅助导航由于其低成本和高可靠性受到研究者的关注。

国内外众多研究人员均致力于无人机视觉系统研究。文献[4-8]涉及到了视觉辅助的无人机位置估计及定位, 视觉算法的运用有效地提高了无人机着陆

收稿日期: 2012-11-22 修回日期: 2012-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61074064)

作者简介: 马园(1987—), 女, 河北保定人, 硕士生, 研究方向为控制理论与控制应用、无人机视觉定位。

阶段的定位精度和可靠性,但飞行过程中依然运用 GPS 或其他导航设备,视觉算法的应用范围受到了限制;文献[9-10]是对整个视觉导航系统的研究,在系统的搭建上做出了贡献,但没有考虑无人机拍摄的图像尺度缩放、旋转问题,会影响到图像匹配的精度。

本文提出的无人机定位算法强调飞行过程中的定位,以尺度不变特征转换(SIFT)图像匹配算法为基础。SIFT 算法具有目标旋转、缩放、平移不变性且不受光照影响的优点,所以图像匹配精度更高,KD-Tree 的搜索算法加快了图像匹配速率,保证了无人机定位的实时性要求;无人机飞行过程中实时采图,利用坐标变换算法 Trf1 和 Trf2 计算目标地面坐标和无人机实时位置,最后设计实验验证定位算法的准确性。

1 SIFT 算法

SIFT 算法^[11]由 David G. Lowe 教授提出并完善,其具体实现可以分为图像特征点生成和不同图像间的特征点匹配两个方面,其算法流程如图 1 所示。

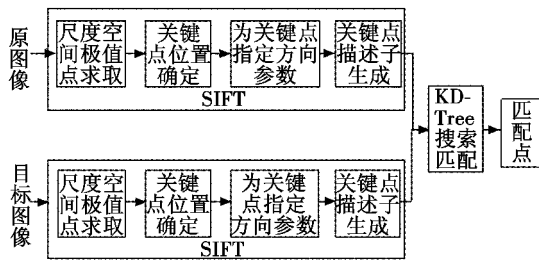


图 1 SIFT 算法步骤

Fig. 1 Steps of SIFT algorithm

由图 1 可以看出,SIFT 算法是要找到两幅图像之间相同部分的像素点坐标,尺度空间 $L(x, y, \sigma)$ 通过输入图像 $I(x, y)$ 与高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 的卷积运算,得到高斯差分尺度空间 DoG

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (1)$$

式中: $G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$; (x, y) 为空间坐标; σ 为尺度空间因子。

极值点通过对检测点与相邻的 26 个点进行比较得到。为了使关键点具备旋转不变性,利用关键点邻域像素梯度方向的分布特性为每个关键点指定方向参数

$$m(x, y) =$$

$$\sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2}$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left[\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right] \quad (2)$$

实际过程中,对每个关键点使用 4×4 共 16 个种子点来描述,这样,每个关键点最终形成一个 128 维的 SIFT 特征向量,对特征向量用 KD-Tree 搜索匹配^[12]得到匹

配点,以提高匹配速率。

2 坐标变换算法

在研究中用到 4 个坐标系^[13]:摄像头坐标系,图像坐标系,机体坐标系,地面坐标系。其关系如图 2 所示。

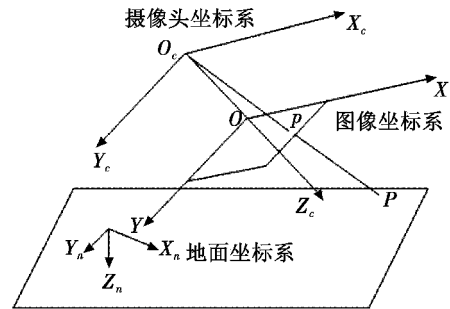


图 2 各坐标系关系

Fig. 2 Relationship among each coordinate system

图 2 中,地面坐标系规定 X_n 为正北方向, Y_n 为正东方向, Z_n 垂直 $X_n - Y_n$ 平面向下,摄像头安装在无人机上,保证摄像头坐标系与机体坐标系一致,当无人机水平位于地面上方时,摄像头光轴垂直于地面。像平面 $X - Y$ 与摄像头坐标系 $X_c - Y_c$ 平行,摄像头光轴穿过像平面原点。

2.1 坐标系之间的变换关系

由文献[7]可以得出地面坐标系与图像坐标系变换关系为

$$\begin{cases} u - u_0 = \frac{r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + t_x}{f_x} \\ v - v_0 = \frac{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y}{f_y} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (u, v) 为图像像素点坐标; (u_0, v_0) 是图像中心(光轴与图像平面的交点)的坐标; $f_x = f \cdot s_x, f_y = f \cdot s_y$ 。其中, f 为焦距, $s_x = 1/d_x, s_y = 1/d_y$ 分别为 X 方向和 Y 方向上的采样频率,即单位长度的像素个数; r_{ij} 为旋转矩阵中的元素,由无人机 3 个方向角决定; (x_w, y_w, z_w) 为像素点的地面坐标; (t_x, t_y, t_z) 为摄像头(即无人机)的地面坐标。

2.2 坐标变换算法 Trf1 (已知摄像头位置,求匹配点地面坐标)

在不同的位置 C_1 和 C_2 采集同一目标 T_1 的图像,设为 P_1 和 P_2 。用 SIFT 算法匹配 P_1 和 P_2 ,得到匹配点 q_i 在两幅图像中的像素坐标 $(u_{1qi}, v_{1qi}), (u_{2qi}, v_{2qi})$,如图 3 所示^[14]。

以匹配点 q_3 为例,匹配点在两幅图像中的像素坐标分别为 (u_{1q3}, v_{1q3}) 和 (u_{2q3}, v_{2q3}) 。对式(3)进行变形写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} (u_{1q3} - u_0)r_{31} - f_x r_{11} & (u_{1q3} - u_0)r_{32} - f_x r_{12} & (u_{1q3} - u_0)r_{33} - f_x r_{13} \\ (v_{1q3} - v_0)r_{31} - f_y r_{21} & (v_{1q3} - v_0)r_{32} - f_y r_{22} & (v_{1q3} - v_0)r_{33} - f_y r_{23} \\ (u_{2q3} - u_0)r_{31}' - f_x r_{11}' & (u_{2q3} - u_0)r_{32}' - f_x r_{12}' & (u_{1q3} - u_0)r_{33}' - f_x r_{13}' \\ (v_{2q3} - v_0)r_{31}' - f_y r_{21}' & (v_{2q3} - v_0)r_{32}' - f_y r_{22}' & (v_{2q3} - v_0)r_{33}' - f_y r_{23}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{q3} \\ y_{q3} \\ z_{q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x x_{c1} - (u_{1q3} - u_0)z_{c1} \\ f_y y_{c1} - (v_{1q3} - v_0)z_{c1} \\ f_x x_{c2} - (u_{2q3} - u_0)z_{c2} \\ f_y y_{c2} - (v_{2q3} - v_0)z_{c2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 为 C_1 点处的旋转矩阵中的元素; r'_{ij} 为 C_2 点处的旋转矩阵中的元素。可得,若已知摄像头所在位置 $C_1 = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ 和 $C_2 = (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$, 即可求出匹配点 q_3 的地面坐标 (x_{q3}, y_{q3}, z_{q3}) 。

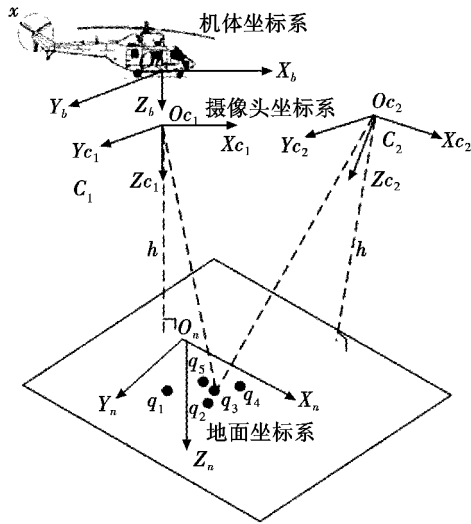


图3 坐标变换算法示意图

Fig.3 Coordinate transformation algorithm

2.3 坐标变换算法 Trf2 (已知匹配点地面坐标,求摄像头位置)

摄像头在位置 C 点,对目标实时采图,与基准图进行匹配,得到匹配点 q_i ,在 q_i 的地面坐标已知的情况下,选取两个匹配点 q_1 和 q_2 ,对式(3)进行变形写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & -(u_{q1} - u_0) \\ 0 & f_y & -(v_{q1} - v_0) \\ f_x & 0 & -(u_{q2} - u_0) \\ 0 & f_y & -(v_{q2} - v_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(u_{q1} - u_0)r_{31} - f_x r_{11}]x_{q1} + [(u_{q1} - u_0)r_{32} - f_x r_{12}]y_{q1} + [(u_{q1} - u_0)r_{33} - f_x r_{13}]z_{q1} \\ [(v_{q1} - v_0)r_{31} - f_y r_{21}]x_{q1} + [(v_{q1} - v_0)r_{32} - f_y r_{22}]y_{q1} + [(v_{q1} - v_0)r_{33} - f_y r_{23}]z_{q1} \\ [(u_{q2} - u_0)r_{31} - f_x r_{11}]x_{q2} + [(u_{q2} - u_0)r_{32} - f_x r_{12}]y_{q2} + [(u_{q2} - u_0)r_{33} - f_x r_{13}]z_{q2} \\ [(v_{q2} - v_0)r_{31} - f_y r_{21}]x_{q2} + [(v_{q2} - v_0)r_{32} - f_y r_{22}]y_{q2} + [(v_{q2} - v_0)r_{33} - f_y r_{23}]z_{q2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

求矩阵的解,即可得到摄像头在地面坐标系中的坐标(即无人机实时位置) $C = (x_c, y_c, z_c)$ 。

3 无人机飞行过程中的定位算法

在以上坐标变换算法 Trf1 和 Trf2 的基础上,无人机飞行过程中的定位算法步骤如下:

1) 在初始位置 $S_1(x_1, y_1, 0)$ 放置目标 T_1 ,无人机在位置 $C_1(x_1, y_1, h)$ 采出目标 T_1 的图像 P_1 ;

2) 在位置 $S_2(x_2, y_2, 0)$ 放置目标 T_2 ,无人机在位置 $C_2(x_2, y_2, h)$ 采出目标 T_2 图像 P_2 ,这里 P_2 图像应包含 P_1 的一部分;

3) 用 SIFT 算法对图像 P_1 和 P_2 进行匹配,得到目标 T_1 的匹配点 m_1 ;

4) 已知 C_1 与 C_2 坐标,用坐标变换算法 Trf1 计算出目标 T_1 的匹配点 m_1 的地面坐标;

5) 在位置 $S_3(x_3, y_3, 0)$ 放置目标 T_3 ,无人机在位置 $C_3(x_3, y_3, h)$ 采出目标 T_3 图像 P_3 ,这里 P_3 图像应包含 P_1 的一部分以及 P_2 的一部分;

6) 用 SIFT 算法对图像 P_2 和 P_3 进行匹配,得到目标 T_1 的匹配点 m_1' 以及目标 T_2 的匹配点 m_2 ,其中匹配点 m_1' 包含于 m_1 中,即 m_1' 的地面坐标已由步骤 5) 求出;

7) 由 m_1' 的地面坐标,利用坐标变换算法 Trf2,即可计算出 C_3 的地面坐标;

8) 此时 C_2 与 C_3 坐标为已知,再利用坐标变换算法 Trf1 计算出 T_2 匹配点 m_2 的地面坐标;

9) 依此类推,在位置 $S_i(x_i, y_i, 0)$ 放置目标 T_i ,无人机在位置 $C_i(x_i, y_i, h)$ 采出目标 T_i 图像 P_i ,这里 P_i 图像应包含 P_{i-1} 的一部分以及 P_{i-2} 的一部分;

10) 用 SIFT 算法对图像 P_i 和 P_{i-1} 进行匹配,得到目标 T_{i-2} 的匹配点 m'_{i-2} 以及目标 T_{i-1} 的匹配点 m_{i-1} ,其中匹配点 m'_{i-2} 包含于 m_{i-2} 中,即 m'_{i-2} 地面坐标已由上面步骤求出;

11) 由 m'_{i-2} 的地面坐标,利用坐标变换算法 Trf2,可计算出 C_i 的地面坐标;

12) 同时 C_{i-1} 与 C_i 坐标为已知,利用坐标变换算法 Trf1 可计算出 T_{i-1} 匹配点 m_{i-1} 的地面坐标。

其流程如图 4 所示,整个算法是一个迭代过程。图 4 中 $C_i(x_i, y_i, h)$ 为无人机位置, $S_i(x_i, y_i, 0)$ 为目标位置,假设无人机在目标的正上方采图, C_1 为无人机起飞位置,所以采出的图像中只包含了目标 T_1 ,下一位置为 C_2 ,采出的图像包含了目标 T_1 和 T_2 ,这样匹配 P_1 和 P_2 ,才能得到 T_1 的匹配点 m_1 。之后采出的图都要包含 3 个目标的图像,以便根据得出的目标匹配点地面坐标求出无人机位置坐标。

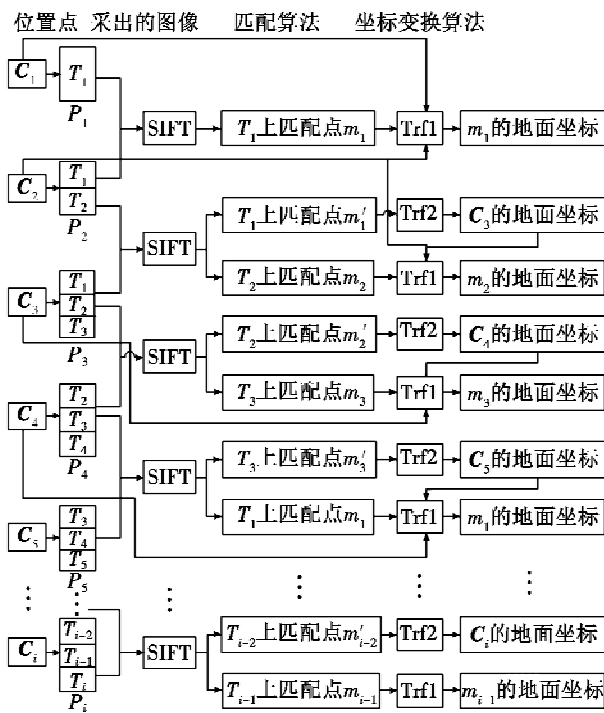


图 4 定位算法实现过程

Fig. 4 Positioning algorithm implementation process

4 仿真结果分析

实验采用 A. K. E A520CCD-i 高清微型摄像头作为视觉传感器,PC104 + CPU 模块 AT-5010 作为机载处理器,并配有 MPEG-4 图像压缩卡,摄像头采集到的视频流经过图像压缩卡变为单帧图像,CPU 模块装有 XP 系统,采集图像并完成图像匹配以及无人机位置及目标位置解算均由 C++ 编程实现。实验中整个飞行过程设置 22 个目标点 S_i , 构成一个环形轨迹,目标点之间相隔 42.5 cm,如图 5 所示。

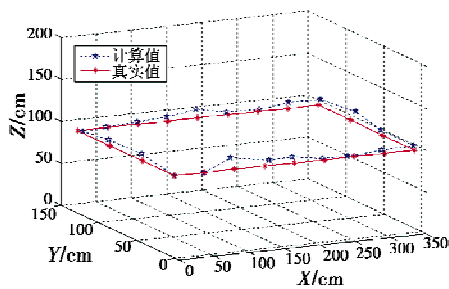


图 5 无人机飞行过程中实时位置与实际位置坐标

Fig. 5 Real-time and actual locations of UAV in flight

无人机从起飞状态开始,摄像头高度 h 为 98.5 cm, 对前 5 个目标进行采图,图像采集与匹配过程如图 6 所示,而整个飞行过程的处理依此类推,以得出整个飞行过程中无人机位置点图像。

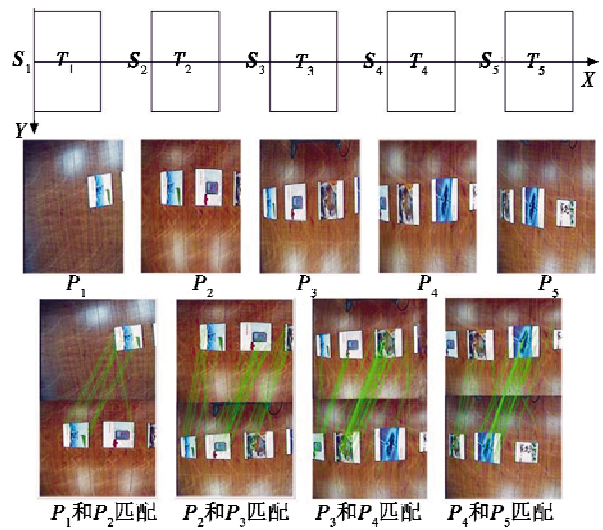


图 6 采集的图像及匹配过程

Fig. 6 The acquired images and matching process

图 6 中, C_i 在 S_i 的正上方,即 $C_i = (x_{ci}, 0, h)$, 已知 $C_1 = (0, 0, -98.5)$ 与 $C_2 = (42.5, 0, -98.5)$, 依此迭代计算整个过程中的目标地面位置及无人机实时位置。实验中得到前 4 个目标匹配点地面坐标分别见图 7。

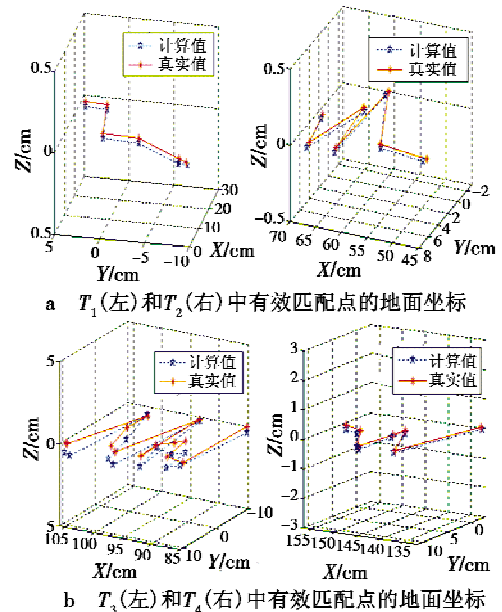


图 7 目标中匹配点地面坐标

Fig. 7 Ground coordinates of matching points in the targets

图 7a 为 T_1 与 T_2 中有效匹配点地面坐标,图 7b 为 T_3 与 T_4 中有效匹配点的地面坐标。其误差分别见图 8。

由图 8 可得,计算出的目标地面位置与实际位置的误差保持在 1 cm 范围内。

在整个飞行过程中无人机 22 个实时位置和设定的实际位置如图 5 所示。

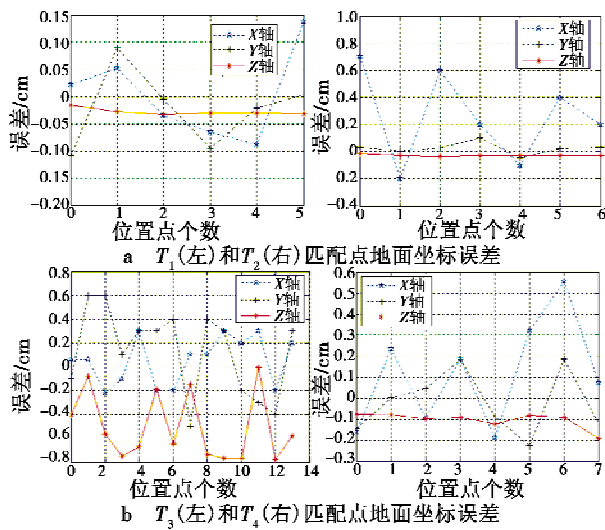


图8 目标中匹配点地面坐标误差

Fig.8 Ground coordinates errors of matching points in the targets

图5数据显示了无人机沿环形路线飞行中实时位置与实际位置。各个方向位置误差如图9所示。

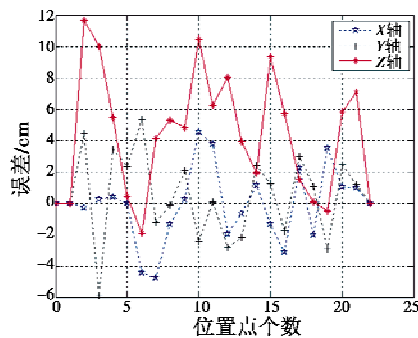


图9 无人机飞行过程中的位置误差

Fig.9 Position errors of UAV in flight

由图9可得,3个方向均存在绝对位置误差,但最大误差仍保持在12 cm之内,验证了飞行过程中的定位精度。虽然位置相对误差达到了10%,但通过提高位置迭代计算的精度,以降低累积误差,会达到比较满意的效果。

5 结束语

本文提出了一种基于视觉的无人机飞行过程中的定位算法,实验表明,该算法得出的无人机位置误差保持在一定误差范围内,具有一定的准确性。该算法基于SIFT匹配算法,充分利用了SIFT的优势,对多个匹配点进行处理,建立了飞行环境地图。无人机飞行过程中实时位置计算基于坐标变换算法,但如果匹配点数量太多,位置的计算时间就会加长,可能会达不到实时性的要求,因此算法值得进一步改善。

参考文献

- [1] 辛哲奎. 基于视觉的小型无人直升机地面目标跟踪技术研究[D]. 天津:南开大学,2010.
- [2] SARRIS Z. Survey of UAV applications in civil markets [C]//The 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation(MED'01), 2001:1-11.
- [3] KONG W Y, EGAN G K, CORNALL T. Feature based navigation for UAVs[C]//Intelligent robots and systems, 2006. IEEE/RSJ International Conference on IEEE, 2006: 3539-3543.
- [4] 刘新华. 基于视觉的无人机着陆姿态检测和跑道识别[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
- [5] 刘国才. 无人机单目机器视觉着陆定位的算法研究及DSP实现[D]. 成都:电子科技大学,2005.
- [6] 陈磊,陈宗基. 基于视觉的无人作战飞机自主着陆导航方案[J]. 北京航空航天大学学报,2007,32(2):159-163.
- [7] 刁灿,王英勋,王金提. 无人机自动着陆中的机器视觉辅助技术[J]. 航空学报,2008,29:79-84.
- [8] SARIPALLI S, MONTGOMERY J F. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(3):371-380.
- [9] CONTE G, DOHERTY P. An integrated UAV navigation system based on aerial image matching[C]//IEEE Aerospace Conference, 2008:1-10.
- [10] FENG L, XIANG X D, CHEN B M. A robust real-time embedded vision system on an unmanned rotorcraft for ground target following[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2):1038-1049.
- [11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [12] MUJA M, LOWE D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration[C]//International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2009:331-340.
- [13] CAI Guowei, CHEN B M, LEE Tongheng. Unmanned rotorcraft systems [M]. London:Springer-Verlag, 2011:23-24.
- [14] JIANG H X, XU J F, GAO Z. Vision-based movement state estimation algorithm for unmanned helicopter landing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4):744-753.