

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.019

基于机器视觉的空间组合体地面实验 位姿测量技术研究^{*}

樊星星¹, 王 班^{1,2*}, 周卫华¹, 郭吉丰¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对空间组合体如绳系系统在地面模拟实验时具有变化复杂和响应快等特点难以实时测量问题,对空间组合体地面模拟实验系统中物体位姿测量和控制方法进行了研究。将非接触式测量的机器视觉技术应用到了组合体地面测量系统中,并从减少图像搜索位置和每个位置处的计算量角度,提出了一种改进的多模板匹配算法配合刚体平面运动位姿算法组成测量系统,以实现运动目标物体图像的实时采集;获取了目标物体上标志点的坐标,再通过坐标变换等计算动态得到了平面刚体运动位姿;利用所研制的地面模拟检测系统进行了直线运动、旋转运动和刚体平面运动等实验测试。研究结果表明:位姿测量系统的最大测量误差不超过5%,采样时间为0.2 s,可满足绳系组合体等空间组合体的测量和控制要求。

关键词:机器视觉;绳系组合体;运动位姿;测量与控制;气浮实验平台

中图分类号:TP29

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)05-0545-05

Position and pose measurement technology of space combination ground experiment based on machine vision

FAN Xing-xing¹, WANG Ban^{1,2}, ZHOU Wei-hua¹, GUO Ji-feng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem that space combination, such as the tethered system can not be measured in real time because of the characteristics of complex and fast response in spatial operations. The measurement and control methods of object position and pose in the ground simulation experiment system were studied. The machine vision technology of non-contact measurement was applied to the ground measurement system. An improved multiple template matching algorithm was proposed to constitute a measurement system combined with rigid plane motion position and pose algorithm in the perspective of reducing the computational complexity of the image search location and each location. The moving target images and the coordinates of the targets on the markers were dynamically acquired. The motion position and pose of the plane rigid body was calculated in real time by coordinate transformation. The experiment of linear motion, rotation motion and rigid plane motion were carried out by using the developed ground simulation detection system. The results indicate that the maximum measurement error of the position and pose measurement system is less than 5%, and the sampling time is 0.2 s, which can meet the requirements of measurement and control of space tethered combination and other combinations.

Key words: machine vision; tethered combination; motion pose; measurement and control; air-floating platform

收稿日期:2017-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475411);浙江省自然科学基金资助项目(LQ17E050011)

作者简介:樊星星(1991—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事空间绳系机器人方面的研究。E-mail: xingxing_fan@zju.edu.cn

通信联系人:王 班,男,博士后,讲师。E-mail: bigban@zju.edu.cn

0 引 言

目前,空间绳系技术已广泛应用于人工重力、交会对接、轨道转移及空间碎片捕获等方面^[1]。空间绳系组合体是空间悬浮下的多个刚体和系绳的组合,如在拖曳过程中可能出现冲击、摆动、翻滚、缠绕、旋转等各种现象,需要通过任务星机动及系绳张力(或收放)控制避免出现上述问题^[2-3]。为此,研究中需进行地面模拟实验,在空间绳系组合体地面模拟实验中需要对目标星和任务星的位姿信息进行实时测量。

以往空间大型桁架的运动位姿(特别是振动情况)常采用加速度计和位移传感器等(接触式装置)等,存在测量误差较大和传感器等辅助实验装置安装困难等问题^[4]。近年来,非接触式的机器视觉也在机器人领域和卫星位姿测量中开始应用^[5]。徐文福等^[6-7]仿真验证了一种针对三角形类帆板支架的识别策略;张世杰等^[8]提出了一种利用单个相机完成非合作航天器间相对位姿参数的测量,在目标物的形状及几何尺寸已知情况下,采用迭代算法求解,但计算时间相对较长;杨宁等^[9]以航天器本体和星箭对接环作为识别特征,获取特征的三维信息,实验是在航天器本体和星箭相对距离为 2 m 的条件下进行,具有一定局限性。这些研究中测量目标或静态或运动非常慢,而如绳系组合体地面模拟防冲击和防缠绕等实验中需要快速测量^[10],快速获取任务星和目标星的运动位姿,这方面的技术和研究很少有文献介绍。

针对以上情况,本文提出一种改进的金字塔多模板匹配算法,以实现运动位姿实时测量。

1 改进的多模板匹配算法

组合体地面仿真模拟实验中,位姿运动信息测量系统的算法主要由多模板匹配算法和位姿运动信息计算算法组成,为了满足测量系统的实时性,需要对匹配算法进行在线运行,再通过实时运动计算算法获得目标星的运动位姿量。

1.1 多模板匹配测量算法改进

传统模板匹配算法的运算量大、耗时长。一种多分辨率的金字塔式匹配算法,用于对搜索图和模板进行多级分解后,将其低频部分作模板匹配,然后逐级上溯,直到在原图上计算出匹配位置^[11-12]。这种算法在识别静态物体时具有较高的匹配精度,然而在跟踪动态物体时,实时性和精度不高。

本研究从减少搜索位置和每个位置处的计算量来考虑,基于 LabVIEW 软件设计一种改进的图像金字塔多个目标模板实时匹配算法,并作为测量系统算法的一部分,多模板匹配测量系统算法如图 1 所示。

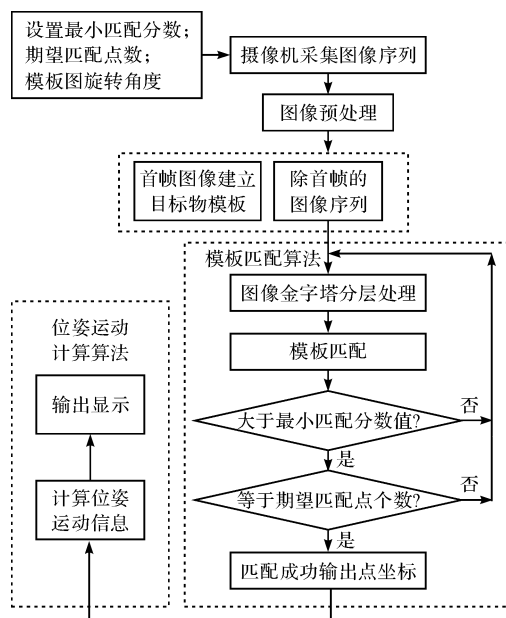


图 1 多模板匹配测量系统算法图

算法改进如下:

(1) 金字塔模板匹配算法须和测量系统其他算法一起线上处理,将机器视觉采集的图像分为首帧和其他帧序列两部分,其中首帧图像用来在线学习后建立多个目标物标志点的模板图片,模板图只需在线建立一次,仅包含目标物体上有明显特征的标志物区域,然后将非首帧图像序列作为查找任务星和目标星的序列库;

(2) 在非首帧的灰度金字塔图像序列库中从分辨率低的金字塔顶层开始匹配查找分层处理后的模板图,并设置范围在 0~1 000 可调的最小匹配分数参数和期望有效匹配点个数参数,来判断查找的匹配点是否有效从而减少搜索位置,如果得到候选匹配点匹配分数大于最小匹配值,再将每个候选匹配点按比例映射到下一层的金字塔图像中,循环此过程,直至查找进行到金字塔最底层图像,匹配过程结束,同时算法得到的匹配点数须等于给定期望匹配点个数,才认为本次匹配成功,为了提高金字塔匹配的精准度,在匹配过程中可以通过改变模板图旋转角度范围这一参数,允许模板图旋转一定角度;

(3) 采用多线程编程技术,将多个目标物模板图的匹配算法运行和绳系组合体位姿运动信息的计算并

行进行,以及多个目标物模板的匹配查找并行进行来提高整个测量系统的运行时间。

1.2 刚体平面运动位姿算法

本文在 LabVIEW 软件中对视觉系统进行点距标定,建立图像像素值与实际物理尺寸之间对应关系。在得到匹配点标定的坐标数据后,为了计算目标星(刚体)的平面运动位姿信息(质心的平动及绕质心的转动),本研究在目标星表面上有两个标志点 A 和 B 用以计算直线运动速度和转动速度。其中, A 点是目标星中心位置标志物的中心点, B 点为目标星表面上标志物的中心点,速度计算示意图如图 2 所示。

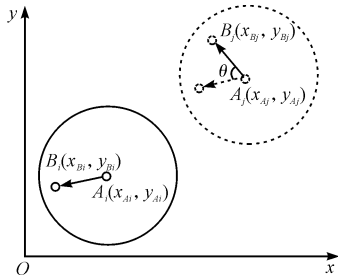


图2 运动速度计算示意图

设 i 时刻 A 点坐标为 $A_i(x_{Ai}, y_{Ai})$, B 点坐标为 $B_i(x_{Bi}, y_{Bi})$, 下一时刻 A 点坐标为 $A_j(x_{Aj}, y_{Aj})$, B 点坐标为 $B_j(x_{Bj}, y_{Bj})$, 则有:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_{Aj} - x_{Ai}}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: v_x —直线速度 x 轴分量; Δx —前后两时刻标志点 A 的 x 轴位移; Δt —前后两帧图像时间; x_{Ai} — i 时刻标志点 A 的 x 轴坐标值; x_{Aj} — j 时刻标志点 A 的 x 轴坐标值。

同理有:

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_{Aj} - y_{Ai}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: v_y —直线速度 y 轴分量; Δy —前后两时刻标志点 A 的 y 轴位移; y_{Ai} — i 时刻标志点 A 的 y 轴坐标值; y_{Aj} — j 时刻标志点 A 的 y 轴坐标值。

则目标星直线速度为:

$$v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} \quad (3)$$

式中: v —目标星直线速度。

向量 A_iB_i 和 A_jB_j 用坐标表示分别为:

$$A_iB_i = (x_{Bi} - x_{Ai}, y_{Bi} - y_{Ai}) \quad A_jB_j = (x_{Bj} - x_{Aj}, y_{Bj} - y_{Aj})$$

可得到角位移量为:

$$\theta = \arccos \left(\frac{A_iB_i \cdot A_jB_j}{|A_iB_i| |A_jB_j|} \right) = \arccos \left(\frac{(x_{Bi} - x_{Ai})(x_{Bj} - x_{Aj}) + (y_{Bi} - y_{Ai})(y_{Bj} - y_{Aj})}{\sqrt{(x_{Bi} - x_{Ai})^2 + (y_{Bi} - y_{Ai})^2} \sqrt{(x_{Bj} - x_{Aj})^2 + (y_{Bj} - y_{Aj})^2}} \right) \quad (4)$$

式中: θ —角位移量; x_{Bi} — i 时刻标志点 B 的 x 轴坐标值; x_{Bj} — j 时刻标志点 B 的 x 轴坐标值; y_{Bi} — i 时刻标志点 B 的 y 轴坐标值; y_{Bj} — j 时刻标志点 B 的 y 轴坐标值。

则目标星的角速度为:

$$\omega = \frac{\theta}{\Delta t} \quad (5)$$

式中: ω —转动角速度。

得到目标星的转动速度为:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\theta}{2\pi\Delta t} \quad (6)$$

式中: n —转动速度。

2 实验系统及测试结果分析

2.1 系统硬件平台

以绳系组合体地面气浮平台实验系统的构成为例,系统硬件主要由任务星(模拟器)、目标星(模拟器)、千兆以太网工业相机(acA2000-50gc)、Gige Vision 帧接收器(美国国家仪器公司)、台式计算机、张力控制机构和弹性系绳等部分组成。任务星与目标星由弹性系绳连接,并借助气浮轴承使任务星与目标星在大理石气浮平台上处于“悬浮”状态。在平面气浮平台上绳系组合体的位姿主要是位移坐标信息,可对空间绳系组合体进行面内动力学行为及控制过程进行模拟。为了使测试能覆盖绳系组合体的各种平面运动情况,本研究对目标星分别进行直线运动、定轴旋转运动和刚体平面运动的测试。

其中,视觉相机的水平/垂直分辨率为 2 046 像素/1 086 像素,相机图像标定后的像素值和实际距离(cm)的比例系数是 6.1,相机位于气浮平台正上方,距离气浮平台的竖直距离是 2.5 m,可观测场范围包含整个长为 3 m,宽 2 m 的气浮平台,测试过程中相机可以获取整个气浮平台上目标物体的位姿信息。

经测试,测量系统中模板匹配算法的单个标志物坐标计算时间在 20 ms 左右。为了保证目标星的实时在线跟踪和速度测量精度,所以摄像机每帧图像采集周期为 0.2 s,即取 $\Delta t = 0.2$ 。

2.2 直线运动测试结果与分析

本研究对 4 组不同运动速度下的运动物体进行位置和速度测量,采用伺服电机驱动滑块移动的直线导轨系统模拟目标星直线运动。标志物模板是包含长 6 cm 和宽 4 cm 黑色矩形块的图片,用来确定标志点位置。

测试实验系统如图 3 所示。

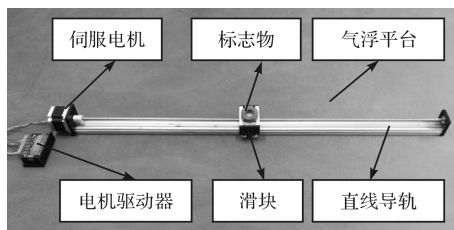


图3 直线运动测试实验图

本研究分别设置滑块给定参考速度为 20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s 和 80 mm/s 时进行实验, 测量结果如图 4 所示。

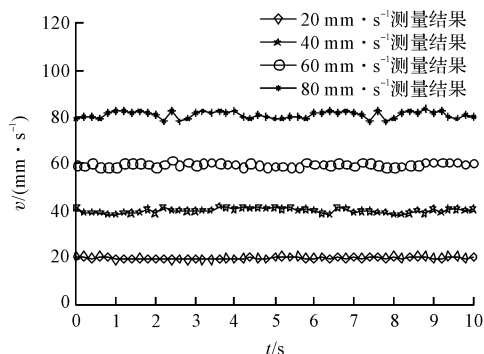


图4 直线运动测试结果

目标星直线运动速度的测量值都在给定值附近波动, 4 组均值 (半径: mm/s) 分别为 20.109, 40.186, 59.979 和 80.966, 在 80 mm/s 时测试均值比较大, 可能原因是导轨滑块运动速度过快导致。计算 4 组测试的最大相对误差分别为: 4.77%, 4.62%, 3.02% 和 4.25%, 直线运动测试最大误差不超过 5%。

2.3 定轴旋转运动测试结果与分析

建立旋转运动测试实验系统如图 5 所示。

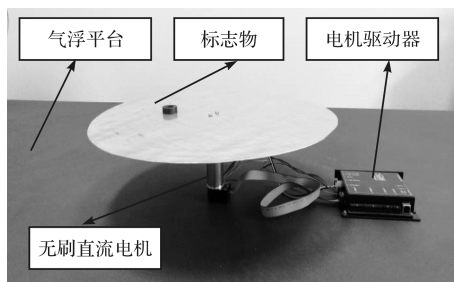


图5 旋转运动测试实验图

无刷直流电机可带动圆盘上的标志物做旋转运动, 其中标志物的模板是包含直径 5 cm 的黑色圆环的图片, 用来确定标志点坐标。

在测试系统计算时, 本研究采用在目标星低速 (5 r/min) 旋转情况下 (一般卫星捕获时的设定转速大多低于该转速), 跟踪定位目标的运动轨迹, 通过轨迹坐

标求得圆心坐标数据。

目标星分别在 20 r/min, 40 r/min, 60 r/min 和 80 r/min 4 种情况下的转动测量结果如图 6 所示。

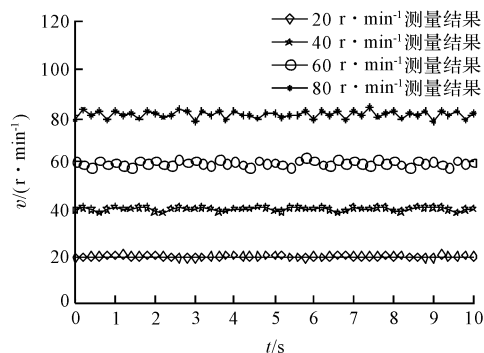


图6 定轴旋转测试结果

目标星转动速度测量均值也都接近给定参考值, 4 组测试的均值 (r/min) 分别为 20.032, 40.156, 59.858 和 80.447, 由于转动测试做定轴周期旋转运动, 速度有较长时间达到稳定状态, 转动测试均值比直线测试均值结果要接近给定值。计算 4 组测量最大相对误差分别为 4.76%, 3.11%, 3.83% 和 4.41%, 也均不超过 5%。

2.4 刚体平面运动测试结果与分析

在上述单独测试基础上, 本研究将定轴旋转实验装置固定到直线导轨之上, 进行刚体平面运动测试。测试实验系统如图 7 所示。

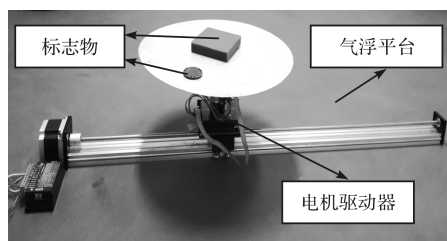


图7 平面运动测试平台

两个标志物模板分别是包含边长 8 cm 的正方形块和直径 5 cm 圆形块的图片, 分别确定目标星表面上的质心和表面点坐标。

根据绳系组合体地面仿真实验工况要求, 在实验平台上以目标星直线速度为 20 mm/s, 40 mm/s 和 60 mm/s, 转动速度均为 4 r/min 3 种情况进行了测试。以直线速度 20 mm/s, 转动速度 4 r/min 为例, 测试结果如图 8 所示。

本研究对刚体平面运动 3 组测试数据处理后可得: 直线速度测量均值 (mm/s) 分别为 20.223, 40.794, 60.802, 最大相对误差为 4.84%, 4.80%, 4.74%; 旋转速度测量均值 (r/min) 分别为 3.988,

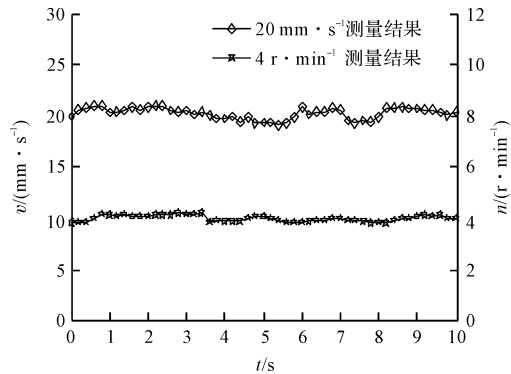


图8 平面运动测试结果

4.063, 4.021, 最大相对误差为 4.85%, 4.87%, 4.72%, 速度测量结果都比较接近给定值, 且最大相对误差不超过 5%。

3 结束语

基于机器视觉技术, 本研究提出改进的多模板金字塔灰度模板匹配算法和刚体平面运动帧间差分速度算法组成测量系统, 只需建立目标物的特征标志模板, 通过算法可实时得到目标物的运动位姿信息, 用于地面气浮平台上的视觉图像检测识别和目标物体运动位姿实时测量。

为了验证测量系统的实时性和精度, 本研究利用直线导轨和无刷直流电机驱动圆盘转动搭建实验测试平台, 进行了相关平动及刚体平面运动测试。实验结果表明, 速度测量最大测量误差不超过 5%, 测量结果均接近速度给定参考值。

同时, 该测量系统和算法对其他需要动态实时测量刚体运动的实验场合具有参考意义。

参考文献 (References):

- [1] 文浩. 绳系卫星释放和回收的动力学控制[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2008.
- [2] 赵国伟, 张兴民, 唐斌, 等. 空间绳系拖拽系统摆动特性与平稳控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(4): 694-696.
- [3] 刘海涛, 张青斌, 杨乐平, 等. 绳系拖曳离轨过程中的摆动抑制策略[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 164-168.
- [4] 刘福强, 岳林, 张令弥. 基于加速度测量的柔性智能桁架结构振动主动控制实验研究[J]. 宇航学报, 2001, 22(3): 21-23.
- [5] 刘伟, 徐斌. 卫星气浮平台视觉测量系统研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(4): 124-126.
- [6] 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 基于立体视觉的航天器相对位姿测量方法与仿真研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1421-1428.
- [7] 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间机器人捕获非合作目标的测量与规划方法[J]. 机器人, 2010, 32(1): 61-69.
- [8] 张世杰, 曹喜滨, 陈闯. 非合作航天器间相对位姿的单目视觉确定算法[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(5): 564-568.
- [9] 杨宁, 申景诗, 张建德, 等. 基于立体视觉的空间非合作航天器相对位姿自主测量[J]. 光学精密工程, 2017, 5(5): 1332-1336.
- [10] 王班. 空间绳网捕获后绳系组合体张力控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2015.
- [11] 罗钟铨, 刘成明. 灰度图像匹配的快速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 966-968.
- [12] 刘云峰, 杨小冈, 齐乃新. 基于模板匹配的前视自动目标识别模型[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 4-6.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

樊星星, 王班, 周卫华, 等. 基于机器视觉的空间组合体地面实验位姿测量技术研究[J]. 机电工程, 2018, 35(5): 545-549.

FAN Xing-xing, WANG Ban, ZHOU Wei-hua, et al. Position and pose measurement technology of space combination ground experiment based on machine vision[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(5): 545-549.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>