

文章编号:1008-1658(2007)02-0013-04

## 多约束条件在薄膜充气天线面形测量中的应用

王 君<sup>1,2</sup>, 吕乃光<sup>2</sup>, 邓文怡<sup>2</sup>, 董明利<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 北京机械工业学院 电子信息工程系, 北京 100085)

**摘 要:**薄膜充气可展开天线的性能受其面形加工的几何精度影响很大, 由于天线本身材质的特点, 在其面形测量的方法中, 非接触式的视觉测量技术具有很大的优势。在对大尺寸薄膜充气可展开天线的面形进行视觉测量过程中, 综合考虑几何约束、极线约束、站位约束、距离约束等多种约束条件, 可以使系统匹配自动化的准确率提高到100%, 测量相对精度达到 $5 \times 10^{-4}$ 以上, 满足天线测量要求, 并且对于测量过程中的网络规划、提高解析计算可靠性等方面起到了关键作用。

**关 键 词:**视觉测量; 约束条件; 薄膜充气天线; 面形测量

**中图分类号:** TB 22 **文献标识码:** A

### Application of various constraints in videogrammetry for the profilement of gossamer inflatable spacecraft antenna

WANG Jun<sup>1,2</sup>, LU Nai-guang<sup>2</sup>, DENG Wen-yi<sup>2</sup>, DONG Ming-li<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Department of Electronic Information Engineering, Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The performance of gossamer inflatable antenna relies on the geometric accuracy of the profile. Because of its flexible material, the traditional measurement technique can hardly meet the requirements. Therefore, the non-contact videogrammetry technique is appreciated. Considering various constraints, which play key roles in the videogrammetry for the profile of gossamer inflatable antenna, the correct rate of image matching reaches up to 100% and relative precision is higher than  $5 \times 10^{-4}$ , which can meet the requirement of antenna measurement. Moreover, these constraints make great contributions to the network planning and system reliability.

**Key words:** videogrammetry; constraints; gossamer inflatable antenna; profile measurement

近年来,随着移动卫星通信、GPS以及航空航天等空间技术的飞速发展,对大尺寸、轻型可展开空间天线的需求越来越多。与其他大型可展开天线相比,薄膜充气天线具有成本低、体积小、可靠性高、重量轻、工作寿命长等优点,因此,在实现空间天线大型化和轻量化的过程中,薄膜充气天线具有较好的应用前景<sup>[1]</sup>。但是,由于薄膜充气天线由工作面和起支撑作用的管状支架构成,其性能很大程度上依赖于它的工作面与几何设计指标相符合的程度,因此需要对薄膜充气天线的实际面形进行测量,并通过实时调整充气压力等方法使其符合设计要求。鉴

于薄膜充气天线所采用的柔性材质,与传统接触式测量相比,非接触式的视觉测量方法在对其工作面的测量中占有很大优势<sup>[2,3]</sup>。

三维视觉测量技术是以数字摄像机获取的图像作为信息载体,计算三维空间中被测物体的物理和几何特征信息,并由此重建物体。作为一种非接触式的测量手段,视觉测量基于严谨的理论和现代的硬软件设施,可达到相当高的精度和可靠性。本文的目的是研究在薄膜充气天线面形的视觉测量过程中,各种约束条件对改善系统自动化水平、运行效率和可靠性等方面的作用。

收稿日期:2007-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50475176);北京市自然科学基金/北京市教委科技发展计划重点项目(KZ200511232019);

北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目(PXM2007-014224-044674);北京市重点实验室(机电系统测控)开放课题。

作者简介:王 君(1978-),男,山东威海人,北京邮电大学电子工程学院博士研究生,主要从事光电信息技术方面的研究。

## 1 视觉测量原理

利用计算机视觉的原理进行空间三维测量,是通过两个或多个摄像机从不同角度对被测物体上的特征点进行成像,利用投影变换,解析其空间坐标,进而获得被测物体的三维特征信息。图 1 所示的是基本的双摄像机测量系统原理。

共线条件约束是描述像点、投影中心以及物方点位于同一直线上的方程式,视觉测量中的大多数解算方法均是基于该约束,其表达方程式为<sup>[2]509</sup>:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{m_{11}(X - X_s) + m_{12}(Y - Y_s) + m_{13}(Z - Z_s)}{m_{31}(X - X_s) + m_{32}(Y - Y_s) + m_{33}(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{m_{21}(X - X_s) + m_{22}(Y - Y_s) + m_{23}(Z - Z_s)}{m_{31}(X - X_s) + m_{32}(Y - Y_s) + m_{33}(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(X, Y, Z)$  和  $(x, y)$  分别是特征点的空间坐标和在像面的成像点坐标,  $(x_0, y_0)$  是像面的主点坐标,  $f$  是主距,  $(X_s, Y_s, Z_s)$  是投影中心的空间坐标,  $m_{ij}$  是像面在空间坐标系方位角  $(\varphi, \omega, \kappa)$  的余弦值组合。可以看出,共线方程是由两个平面方程构成,两个平面方程的交线即是该共线方程所描述的像点、投影中心和物点的连线。

对于某个空间点,视觉测量系统通过多站位对其成像,每次成像都可以构成一个共线方程,这样,由两个或两个以上的像面就可以解析获得空间点的坐标。如果在天线的形面上布置足够多的特征点,就可以在测量所有特征点空间坐标的基础上,对天线的面形进行拟和,从而完成对天线的重构和测量。

## 2 几何约束

薄膜充气天线的设计面形为旋转抛物面,在天线一侧表面布置普通特征点,以抛物面的顶点为中心成辐射条状分布,称为标志条。对于每个标志条来说,相互之间的夹角大约相等,其上的点近乎位于空间直线上,而且特征点之间的点距大致相等,这就为系统对特征点的自动识别和查找对应关系提供了空间几何约束,便于多幅图片之间特征点的匹配对应关系处理。其算法过程描述为:

①在每幅图像上搜索标志条上的起始特征点  $A$ ,该特征点可以通过编码点或者特殊标记点来确定;

②从  $A$  点开始,按照一定的角度方向,在图像上查找下一个点  $B$ ;

③通过  $A$  点与  $B$  点,可以确定标志条在图像上的大致方向  $\vec{AB}$ ,并结合特征点在空间等距的约束条

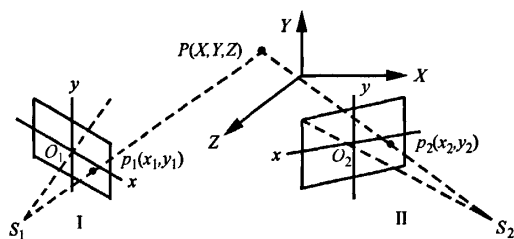


图 1 双摄像机视觉测量原理图

件,可以搜索到标志条上的下一个特征点  $C$ ;

④将  $B$  点记作  $A$ ,  $C$  点记作  $B$ ,同时重新修正标志条的方向  $\vec{AB}$ ;

⑤重复进行上面的步骤③、④,直到完成所有标志条的搜索。

通过几何约束条件,不仅可以获得天线形面上所有特征点在不同像面上成像的匹配对应关系,同时,根据直线、等距等条件,可以解决天线形面上特征点被遮挡情况的判断。

## 3 极线约束

### ①双极线约束

双极线约束条件是视觉测量中常用的特征点匹配约束条件。当摄像机参数求得后,用  $M_1, M_2$  分别表示双摄像机的投影矩阵,即:

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_5 & b_6 & b_7 & b_8 \\ b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} \end{bmatrix}$$

对于每一个  $3 \times 4$  矩阵  $M_i (i = 1, 2)$ , 设  $M_i = [M_{i1} \ m_i]$ , 其中,  $M_{i1}$  为  $M_i$  左边的  $3 \times 3$  矩阵,  $m_i$  为  $M_i$  的第 4 列。对于匹配点对  $p_1(x_1, y_1)$  和  $p_2(x_2, y_2)$ , 有如下极线方程<sup>[4]</sup>:

$$u_2^T [m]_x M_{21} M_{11}^{-1} u_1 = 0 \quad (2)$$

其中, 向量  $m = m_2 - M_{21} M_{11}^{-1} m_1$ ,  $[m]_x$  为由  $m$  确定的反对称矩阵,  $u_1 = [x_1, y_1, 1]^T$ ,  $u_2 = [x_2, y_2, 1]^T$ 。式(2)的意义是,它给出了两个摄像机对应匹配点  $p_1$  与  $p_2$  所必须满足的关系。

### ②三极线约束

双极线约束将在二维像面空间搜索的匹配问题

转换为在一维极线空间搜索,大大减少了搜索范围。但由于透镜畸变、摄像机空间站位的方位角、被测物的部分表面遮挡等问题,单靠双极线约束仍然无法完全解决匹配问题。

在双极线约束的基础上,采用三极线约束,可以进一步将不同像面上匹配点的搜索范围由二维极线缩小到有限离散点上。

假设空间点  $p$  在 3 幅不同像面 I, II, III 上的成像分别为  $p^1, p^2$  和  $p^3$  (图 2), 由于畸变等因素的影响, 像点  $p^1$  在像面 II 上的极线  $l_{12}$  一般会偏离  $p^2$  点, 容易造成误匹配。但根据双极线约束, 可以选取离  $l_{12}$  最近的  $m$  个点, 做为像面 II 上与  $p^1$  匹配的候选点集  $C_{12}$ , 即  $C_{12} = \{p_1^2, p_2^2, \dots, p_m^2\}$ , 那么有  $p^2 \in C_{12}$ 。

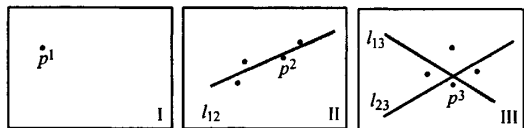


图2 三极线约束

同样, 像点  $p^1$  在像面 III 上的极线  $l_{13}$  同样会偏离  $p^3$  点, 得到像面 III 上与  $p^1$  匹配的候选点集  $C_{13}$ , 即  $C_{13} = \{p_1^3, p_2^3, \dots, p_n^3\}$ , 有  $p^3 \in C_{13}$ 。

另外, 对每个属于  $C_{12}$  的点  $p_i^2 (i=1, 2, \dots, m)$ , 根据其在像面 III 上的极线  $l_{23}$ , 同样可以得到与之匹配的候选点集  $C_{23}^i$ , 那么  $p^3 \in C = \bigcup_{i=1}^m C_{23}^i \cap C_{13}$ 。

所以, 像面 III 上与  $p^1$  对应的点由极线  $l_{12}, l_{13}$  以及  $l_{23}$  限制在有限点集  $C$  中, 称其为三极线约束。

## 4 站位布局约束

根据视觉测量的原理, 通常情况下, 对特征点至少需要两次, 也就是两站位成像, 才能对其空间坐标进行解析。在实际应用中, 为了提高解析精度以及受物体形状等方面的限制, 往往需要在不同站位, 对被测物体进行多站位、多角度的成像, 通过最小二乘、光束平差等方法, 对结果进行优化, 获得最优解。因此, 优化的摄像机站位组合构成视觉测量中的网络布局约束。综合考虑不同的网络布局因素对测量精度的影响, 构成了用于评价网络布局精度的估算表达式<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_s = (k_2/k_1) \cdot (1/\sqrt{n}) \cdot \sigma = S\sigma \quad (3)$$

其中,  $\sigma_s$  是三维点空间坐标的标准差,  $k_1$  是基距比( $B/D$ ),  $k_2$  是成像放大比例,  $n$  表示成像的次数,  $\sigma$  表示图像处理的精度。记  $S = (k_2/k_1) \cdot (1/$

$\sqrt{n})$  为“网络强度”, 用来表示测量网络结构的精度高低。

除了应用式(3)对网络精度进行估算外, 还有其它独立或互相冲突的约束因素需要考虑:

### ① 图像比例和分辨率约束

三角测量精度与图像比例成正比, 而分辨率约束要求物体在像面上解析度必须满足图像测量的要求精度  $\sigma$ , 这影响到采用人工特征点时靶点的设计以及图像比例的选择。式(3)可以重新整理得:

$$\sigma_s = (k_2/k_1) \cdot (1/\sqrt{n}) \cdot \sigma = (d/fk_1) \cdot (1/\sqrt{n}) \sigma \\ \Rightarrow d = fk_1 \sqrt{n} \cdot (\sigma_s/\sigma)$$

$d$  表示在指定精度的前提下, 最大允许的摄像机与被测物之间距离。

### ② 景深和视场约束

图像处理的精度受镜头调焦的影响很大, 该约束的目的是保证特征点成像在焦距范围之内。根据摄像机可接受的分辨率, 物距上存在一个范围, 使特征点的成像满足要求。视场约束要求特征点成像到像平面的有效区域, 并要求所有特征表面完全位于摄像机的视野范围之内。

### ③ 像点分布和数量约束

大量额外冗余特征点将增强摄影测量方位的统计可靠性, 同时像点的数量和分布同样会影响摄像机的标定精度。

### ④ 入射角度约束

当物点光线进入摄像机的入射角度增大到一定的值时, 图像测量的可靠性会降低。不同的特征点、材料和形状都会影响入射角的上限值。薄膜充气天线采用的是圆形自反射特征点, 入射角的上限值大约是  $60^\circ \sim 70^\circ$ 。

## 5 距离约束

距离约束<sup>[6]</sup>包括摄站之间的距离约束、两物点间的距离约束以及摄站点和物点之间的距离约束等。根据实际可操作性, 通常采用的是两物点间的距离约束, 它是指视觉测量中以场景内已知物点距离为真值作为约束条件, 与像点测量值残余误差平方和最小为目标函数, 构成新的最优化问题。这些作为约束条件的标准距离可称为标准尺, 其上的点称为控制点, 在视觉测量系统中, 控制点也是测量点的一种, 需计算其空间坐标  $P_j(X_j, Y_j, Z_j)$  和  $P_k(X_k, Y_k, Z_k)$ , 则测量长度与标准长度  $L_{jk}$  之间的关系可表示:

$$F_{kj} = (X_k - X_j)^2 + (Y_k - Y_j)^2 + (Z_k - Z_j)^2 - L_{kj}^2 = 0 \quad (4)$$

将标准长度  $L_{kj}$  作为真值, 则公式(5)的线性化形式为:

$$F_{kj} = F_{kj}^0 + \frac{\partial F}{\partial X_k} \Delta X_k + \frac{\partial F}{\partial Y_k} \Delta Y_k + \frac{\partial F}{\partial Z_k} \Delta Z_k + \frac{\partial F}{\partial X_j} \Delta X_j + \frac{\partial F}{\partial Y_j} \Delta Y_j + \frac{\partial F}{\partial Z_j} \Delta Z_j = 0 \quad (5)$$

根据拉格朗日乘数法, 将式(5)作为条件方程与像点坐标的残余误差平方和构成新的目标函数:

$$J(\bar{b}) = \sum V^T V + \sum \lambda_i F_{kj} = \min \quad (6)$$

式中第一项是所有像点的残余误差平方和, 第二项是所有距离约束;  $\lambda_i$  是约束条件的拉格朗日乘子;  $\bar{b} = (\varphi, \omega, \kappa, X_s, Y_s, Z_s, X, Y, Z, f, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, \lambda)$  是由视觉测量系统中摄像机的内外方位参数、畸变系数和拉格朗日乘子构成的向量。

## 6 实验结果

实验对轻型薄膜充气可展开天线进行视觉测量, 采用普通非量测数码相机, 在天线表面布置人工自反射特征点, 并在视场中布有标准靶标和标准尺等。薄膜充气天线的直径大约是 3.5 m, 深度 0.5 m, 设计面形为旋转抛物面, 综合考虑网络布局结构约束条件, 设计摄像机可能站位空间如图 3 所示。

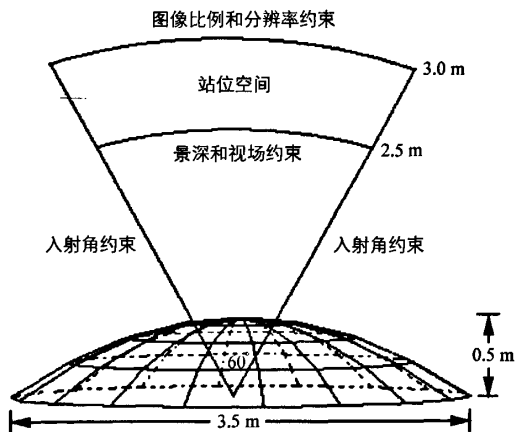


图3 摄像机站位空间图

按照网络布局约束对摄像机站位进行设置, 采用 4 个站位, 每个站位拍摄 2 次(第二次拍摄是在第一次拍摄的方位角基础上做 90° 旋转, 目的是为了便于摄像机的自标定), 共 8 幅图片。采集的图像经过亚像素技术处理后得到特征点的中心坐标, 利

用空间几何约束条件和极线约束条件相结合的方法进行多图像之间的特征点匹配, 正确率可以达到 100%。

在对特征点的空间坐标解算过程中, 采用了带距离约束条件的光束平差法, 经过最小二乘法对空间坐标数据进行拟合后, 得到三维重构后的薄膜充气天线空间面形结构和特征参数。

像点残余误差和紧密度分别表示了测量系统中像点的计算精度和空间点的测量精度, 通过对测量结果的分析, 50% 的像点坐标的残余误差小于 0.10 像素, 而且 50% 的空间点坐标的紧密度小于 0.048%, 可满足微波天线的面形精度测量要求。

## 7 结束语

在对薄膜充气可展开天线的视觉测量工程中, 通过有针对地结合几何约束、极线约束、布局站位约束、空间距离约束等条件, 不仅可以提高系统的自动化水平, 而且对于改善测量精度和工作效率都起到了很大的帮助。

## 参考文献:

- [1] 王援朝. 充气天线结构技术概述[J]. 电讯技术, 2003(2): 6-11
- [2] Lü Naiguang, Deng Wenyi, Wang Yongqiang. Profile measurement of microwave antenna using close range photogrammetry[C]. 3rd International Conference on Experimental Mechanics. United States: Proceedings of SPIE, 2005
- [3] Frank Chen, Gordon M Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-21
- [4] 马颂德. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [5] Wang Jun, Lü Naiguang, Dong Mingli, Niu Chunhui. A New Method for Linear Camera Calibration and Nonlinear Distortion Correction[C]. 3rd International Symposium on Precision Mechanical Measurements. United States: Proceedings of SPIE, 2006
- [6] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>