

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **7**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年7月 第17卷 第7期(总第195期)

目次

综述

中国多媒体技术研究: 2011 史元春, 徐光祐, 高原(741)

图像处理和编码

图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中(748)

基于第一主成分方向稳定性的图像零水印 付剑晶, 王珂(756)

小波变换估计非线性扩散最优停止时间 蒋平, 张建州(770)

图像分析和识别

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征 曾接贤, 周沥沥, 符祥(775)

动静态信息融合及动态贝叶斯网络的步态识别 杨旗, 薛定宇(783)

融合音频单词与视觉特征的成人视频检测 刘毅志, 唐胜, 王向东, 林守勋, 张勇东(791)

基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣(798)

3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取 丁德福, 程柳航, 王利生(806)

局部时空域模型的核密度估计目标检测方法 王兴宝, 刘纯平, 费兰英, 王朝晖, 季怡(813)

基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 曲智国(821)

图像理解和计算机视觉

“目标-场景”语境关联的生成图模型分析 谢昭, 李姍琦, 高隼(828)

融合上下文信息的场景结构恢复 武晖, 于昕, 隋尧, 张利(839)

带有局部控制因子的图割光流估计 路子赟, 唐土生, 高隼, 沈琳, 刘伟(846)

改进的 Harris 亚像素角点快速定位 何海清, 黄声享(853)

计算机图形学

应用最小生成树实现点云分割 孙金虎, 周来水, 安鲁陵(858)

医学图像处理

病毒进化的离散差分进化超声图像特征选择 张巧荣, 朱长明, 倪军, 刘海波(866)

分水岭优化的 Snake 模型肝脏图像分割 兰红, 张璐(873)

遥感图像处理

Normalized Cut 与分水岭变换在高光谱影像混合像元端元提取中的应用 许菡, 李小娟(880)

改进非局部均值滤波的 SAR 图像降噪方法 郑永恒, 程建, 曹宗杰(886)

~~~~~  
第四届国际遥感考古会议 ..... (892)

**中国图象图形学报**

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 7 期

2012 年 7 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

( Monthly , Started in 1996 )

Vol. 17 No. 7 July 2012

## Contents

### Review

Researches on multimedia technology in China, 2011 ..... Shi Yuanchun, Xu Guangyou, Gao Yuan (741)

### Image Processing and Coding

Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering  
..... Fang Shuai, Yang Jingrong, Cao Yang, Wu Pengfei, Rao Ruizhong (748)

Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector ..... Fu Jianjing, Wang Ke (756)

Stopping-time estimation for anisotropic diffusion using discrete wavelet transform ..... Jiang Ping, Zhang Jianzhou (770)

### Image Analysis and Recognition

Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator  
..... Zeng Jiexian, Zhou Lili, Fu Xiang (775)

Gait recognition based on dynamic & static information fusion and dynamic bayesian network ..... Yang Qi, Xue Dingyu (783)

Fusing audio-words with visual features for adult video detection  
..... Liu Yizhi, Tang Sheng, Wang Xiangdong, Lin Shouxun, Zhang Yongdong (791)

Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions  
..... Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong (798)

Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images ..... Ding Defu, Cheng Liuhang, Wang Lisheng (806)

Foreground object detection method using kernel density estimation of a local spatio-temporal model  
..... Wang Xingbao, Liu Chunping, Fei Lanying, Wang Zhaohui, Ji Yi (813)

Saliency detection method based on phase spectrum and amplitude spectrum tuning  
..... Li Chongfei, Gao Yinghui, Lu Kai, Qu Zhiguo (821)

### Image Understanding and Computer Vision

"Object-Scene" contextual associated generative graph model analysis ..... Xie Zhao, Li Shanqi, Gao Jun (828)

Structure recovery algorithm using contextual information ..... Wu Hui, Yu Xin, Sui Yao, Zhang Li (839)

Graph cut optical flow estimation with a local control factor ..... Lu Ziyun, Tang Tusheng, Gao Jun, Shen Lin, Liu Wei (846)

Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection ..... He Haiqing, Huang Shengxiang (853)

### Computer Graphics

Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree ..... Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling (858)

### Medical Image Processing

Virus-evolutionary discrete differential evolution algorithm for feature selection of cervical lymph nodes in ultrasound images  
..... Zhang Qiaorong, Zhu Changming, Ni Jun, Liu Haibo (866)

Liver image segmentation algorithm based on the Snake model And optimized by watershed transformation  
..... Lan Hong, Zhang Lu (873)

### Remote Sensing Image Processing

Endmember extraction for hyperspectral image based on normalized cut and watershed transformation  
..... Xu Han, Li Xiaojuan (880)

SAR image denoising via improved non-local means filter ..... Zheng Yongheng, Cheng Jian, Cao Zongjie (886)

中图法分类号: TP391.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)07-0798-08

论文引用格式: 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣. 基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 798-805.

## 基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量

回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣

国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 长沙 410073

**摘要:** 提出一种从序列图像中自动跟踪测量目标位置和姿态参数的方法。利用单应性原理和上一帧图像中目标位姿参数的测量结果, 将目标上的典型平面区域重建为同时含有几何信息和亮度信息的平面区域模板; 然后根据投影方程, 将该模板在一定的位姿参数下进行投影仿真成像, 当模板的仿真成像结果与当前帧图像中的该平面区域达到最佳匹配时, 认为此时仿真成像的位姿参数即为当前帧图像的测量结果。通过对该匹配问题进行最优化建模和求解, 实现了序列图像中目标位姿参数的自动测量。实验结果表明, 本文方法能够在序列图像中对含有典型平面区域的目标实现较高精度的自动跟踪测量。

**关键词:** 序列图像; 最优化模型; 位姿参数测量; 目标跟踪

### Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions

Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong

ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract:** An automatic method for the measurement of an object's position and attitude in an image sequence is proposed. First, a 2D template of an object's planar region is reconstructed with brightness and the real geometry size, by using the homographies and measurement results from the previous frame image; second, with different position and attitude parameters, the template is projected onto the image plane through the imaging formulations. When the template's projection matches the object region of the current frame properly, the position and attitude parameters are considered to be the measurement results in the current frame image. An optimization model is built and solved to achieve the measurement for the object's position and attitude. The experiments show that the method can measure the position and attitude of an object involving a typical planar region automatically from image sequences.

**Key words:** image sequence; optimization model; position and attitude measurement; object tracking

## 0 引言

测量序列图像中目标的位姿参数, 是分析目标运动状态的主要方法, 在许多工程领域有重要的应用<sup>[1]</sup>。为提高测量精度和自动化程度, 大量学者提

出许多行之有效的办法。目前, 现有的目标位姿参数测量方法可分为以下3类: 1) 基于3维模型的方法<sup>[2-5]</sup>, 这类方法在测量前首先建立待测目标的3维几何表面模型; 然后根据成像方程对目标几何表面模型进行仿真投影, 同时利用最优化算法使目标的仿真投影与真实摄取的目标图像在一定度量下达到

收稿日期: 2011-09-14; 修回日期: 2012-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(60872153)

第一作者简介: 回丙伟(1985—), 男, 国防科技大学电子科学与工程学院专业博士研究生, 主要研究方向为数字摄影测量、计算机视觉。

E-mail: emailhui@163.com

最佳匹配,此时目标位置姿态的仿真参数即为测量结果。这类方法的特点是能够高精度自动跟踪测量目标的位姿参数,但是由于构建待测目标的 CAD 模型需要其完整的先验几何信息,这对测量实际提出了较为苛刻的要求。2) 基于目标典型几何特征的方法<sup>[6-8]</sup>,这类方法从图像的目标区域中检测并提取较为稳定的几何特征如飞机翼展的直线边缘、对称目标的中轴线等,并利用立体像对交会测量出目标的空间位置和姿态。这类方法通常在立体交会摄像情况下,用于几何结构规则的目标测量。3) 基于目标控制点的方法<sup>[9-13]</sup>,这类方法也称为 PNP(N 点透视投影)问题解法,即从目标图像中选取若干个控制点,利用刚体目标在空间中的平移旋转关系和中心投影成像的共线方程,求解目标在空间中的位姿参数。这类方法的研究相对成熟,但在序列图像中利用计算机准确识别出控制点较为困难,因此难以提高测量的自动化水平。

综上所述,第 1 方法能够实现对目标稳定的自动跟踪测量,而第 2 方法和第 3 方法在目标的自动化测量方面存在一定的困难。本文的目的是在不构建目标 3 维模型的前提下,提高测量的自动化程度。考虑到实际应用中大量人造目标本身或目标的一部分具有典型的平面结构,利用平面结构的 2 维特性,根据匹配测量的基本思想,提出一种序列图像中目标位姿参数的跟踪测量方法。首先利用上一帧图像中位姿测量结果,根据单应性原理重建出目标典型区域的平面模板;然后将该模板按已知的摄像机参数在像平面上进行仿真投影,并以目标的位置姿态参数为待求量建立目标投影匹配的最优化模型;最后根据序列图像中目标位置姿态参数的连续性特点,以目标在上一帧图像中的测量结果作为初值,利用高斯牛顿法迭代原理求解最优化数学模型从而实现序列图像中平面目标的位置姿态测量。本文的跟踪测量方法可以在已知目标在第 1 帧图像中的位置姿态参数后,对后续帧图像顺次进行自动跟踪测量,提高测量的自动化处理程度。

### 1 刚体目标成像模型

空间中目标的位置姿态通常用 6 个参数进行描述,即目标坐标系原点  $O$  的空间坐标  $(X_o, Y_o, Z_o)$ , 以及目标的 3 个空间旋转角  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 。假设目标坐标系中的任意一点  $(X', Y', Z')$ , 根据刚体变换原

理,世界坐标系下该点坐标为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{o1} & a_{o2} & a_{o3} \\ b_{o1} & b_{o2} & b_{o3} \\ c_{o1} & c_{o2} & c_{o3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $a_{oi}, b_{oi}, c_{oi} (i = 1, \dots, 3)$  是由目标的 3 个姿态角  $\alpha, \beta, \gamma$  所决定的旋转矩阵元素。在目标坐标系中,假设目标按先绕  $X$  轴,再绕  $Y$  轴,最后绕  $Z$  轴的顺序进行顺次旋转时,该旋转矩阵为

$$\begin{bmatrix} a_{o1} & a_{o2} & a_{o3} \\ b_{o1} & b_{o2} & b_{o3} \\ c_{o1} & c_{o2} & c_{o3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于摄像机成像,在不考虑镜头畸变的情况下,根据中心投影的共线方程可知世界坐标系中的一点  $(X, Y, Z)$  对应的图像坐标  $(x, y)$  为

$$\begin{cases} x = x_0 - f_x \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y = y_0 - f_y \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $x_0, y_0$  为像主点的图像坐标;  $f_x, f_y$  为摄像机在分别在  $x, y$  方向上的主距;  $a_i, b_i, c_i (i = 1, \dots, 3)$  是由摄像机外参数  $\varphi, \omega, \kappa$  确定的旋转矩阵元素;  $X_s, Y_s, Z_s$  是摄像中心在世界坐标系中的坐标。这些参数对于测量来说是事先标定好的已知量。对于位置姿态参数的测量问题,若已知若干个控制点在目标坐标系中的坐标以及对应的图像点坐标,并将这些坐标代入式(1)和式(3)联立非线性方程组,此时只有目标的 6 个位置姿态参数是未知量;通过方程组求解实现测量。上述过程即为 PNP 问题的解算基础。

### 2 图像跟踪测量

在实际测量应用中,许多人造目标本身或目

标的一部分具有或近似具有平面结构。而平面结构的 2 维特性,使之能够利用其位置姿态参数根据单应性原理,建立起目标平面区域上的模型点与图像点明确的对应关系。此外,在相邻两帧序列图像中,目标的位置姿态参数具有一定的连续性<sup>[14]</sup>。

假设待测目标存在典型的平面区域,且第 1 帧图像中目标位置姿态参数已经利用基于控制点的方法实现正确测量后,对序列图像中的目标位置姿态参数进行跟踪测量,基本流程如图 1 所示。

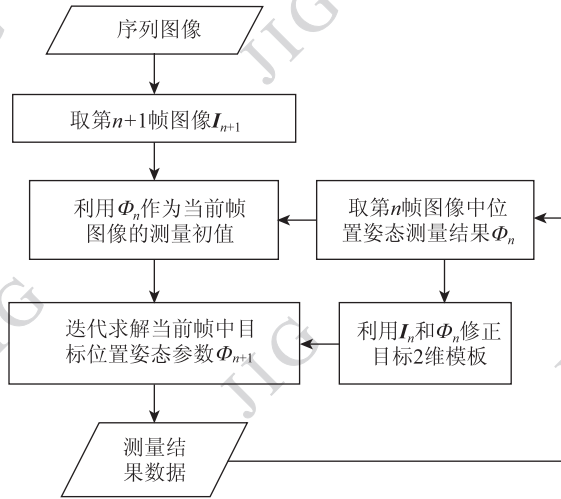


图 1 平面目标跟踪测量的基本流程

Fig. 1 Flow chart of tracking planar object for measurement

## 2.1 平面模板

平面模板定义如下:平面模板是指按照目标中平面区域的真实几何尺寸,从图像中恢复出来的带有平面区域表面亮度信息的 2 维描述模型。该模型包含两部分的信息;1)平面区域的几何信息;2)区域表面的亮度信息。在离散情况下,可用一个坐标集合和一个同样维数的灰度向量进行表述。

假设目标的平面区域位于目标坐标系的  $X'OY'$  坐标平面上。此时,目标平面区域上的坐标点,在式(1)中的  $Z' = 0$ ,假设已知目标位置姿态参数  $X_o, Y_o, Z_o, \alpha, \beta, \gamma$ ,并将式(1)代入式(3),进行适当代换可得任意一点从目标坐标系到图像坐标系的单应性变换式  $H(X', Y') = (H_x, H_y)$ ,即

$$\begin{cases} x = H_x(X', Y') = \frac{l_1 X' + l_2 Y' + l_3}{l_7 X' + l_8 Y' + l_9} \\ y = H_y(X', Y') = \frac{l_4 X' + l_5 Y' + l_6}{l_7 X' + l_8 Y' + l_9} \end{cases} \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases} l_1 = x_0(a_3 a_{o1} + b_3 b_{o1} + c_3 c_{o1}) - f_x(a_1 a_{o1} + b_1 b_{o1} + c_1 c_{o1}) \\ l_2 = x_0(a_3 a_{o2} + b_3 b_{o2} + c_3 c_{o2}) - f_x(a_1 a_{o2} + b_1 b_{o2} + c_1 c_{o2}) \\ l_3 = -x_0[a_3(X_o - X_s) + b_3(Y_o - Y_s) + c_3(Z_o - Z_s)] + f_x[a_1(X_o - X_s) + b_1(Y_o - Y_s) + c_1(Z_o - Z_s)] \\ l_4 = y_0(a_3 a_{o1} + b_3 b_{o1} + c_3 c_{o1}) - f_y(a_2 a_{o1} + b_2 b_{o1} + c_2 c_{o1}) \\ l_5 = y_0(a_3 a_{o2} + b_3 b_{o2} + c_3 c_{o2}) - f_y(a_2 a_{o2} + b_2 b_{o2} + c_2 c_{o2}) \\ l_6 = -y_0[a_3(X_o - X_s) + b_3(Y_o - Y_s) + c_3(Z_o - Z_s)] + f_y[a_2(X_o - X_s) + b_2(Y_o - Y_s) + c_2(Z_o - Z_s)] \\ l_7 = a_3 a_{o1} + b_3 b_{o1} + c_3 c_{o1} \\ l_8 = a_3 a_{o2} + b_3 b_{o2} + c_3 c_{o2} \\ l_9 = -[a_3(X_o - X_s) + b_3(Y_o - Y_s) + c_3(Z_o - Z_s)] \end{cases}$$

式(4)表明可以根据目标的位姿参数从图像中恢复出平面区域的几何结构;同时,根据图像灰度实现平面区域的纹理映射,即重建出平面模板。

理论上,序列图像的每一帧恢复出的平面模板是完全相同的。但实际中,由于目标运动或环境变化等因素造成的光线变化,图像中目标的亮度并不稳定,为能利用模板对当前图像  $I_k$  实现稳健的跟踪,本文在跟踪测量前每次都利用式(4)从上一帧的图像  $I_{k-1}$  的测量结果中恢复当前平面目标模板  $T_{k-1}$ 。

设模板  $T_{k-1} = (Q_{k-1}, G_{k-1})$  由  $M$  个离散的 2 维点及其对应的亮度值组成的集合表示,其中  $Q_{k-1} = \{(X'_i, Y'_i) \mid (i = 1, \dots, M)\}$  为 2 维坐标点集合;  $G_{k-1} = (g_1, g_2, \dots, g_M)$  为所有坐标点对应的灰度向量;且对每一个分量都有  $g_i = I_{k-1}(H(X'_i, Y'_i))$ 。另外,由于经过变换  $T$  计算所得的图像点坐标通常不是整像素坐标值,故在计算  $I_{k-1}(H(X', Y'))$  时需对图像进行插值处理,从插值效果和计算效率两方面考虑,选用双线性插值。

此外需要说明的是,对立体目标的典型平面区域进行模板重建,还需要在目标坐标系中指定待跟踪的平面区域,从而进一步从图像中分割出待跟踪的目标平面区域进行亮度映射。

## 2.2 跟踪测量的数学模型

序列图像中匹配跟踪的基本原理是:利用参数化数学模型描述已知目标区域与待跟踪图像中目标区域之间的变换关系,然后以这些参数为待求量,使已知的目标区域与含有该目标区域的待跟踪图像在一定的度量准则下达到最佳的匹配效果<sup>[15]</sup>。

根据刚体目标的成像原理可知,目标平面模板

上的任意一点  $(X_i, Y_i)$ , 在一定的位姿参数向量  $X_o, Y_o, Z_o, \alpha, \beta, \gamma$  下, 根据式(3)的中心投影公式可与图像中的一点  $(x_i, y_i)$  恰好对应, 因此式(1)的刚体变换模型与式(3)的中心投影方程共同组成了对应关系的参数化模型  $C$ , 其待求量为  $X_o, Y_o, Z_o, \alpha, \beta, \gamma$ 。对于模板  $T_{k-1}$  中的点集  $Q_{k-1}$ , 在任意给定一组  $X_o, Y_o, Z_o, \alpha, \beta, \gamma$  参数的情况下, 根据模型  $C$  可得到一个对应的图像点集  $P_k = \{(x_i, y_i) \mid (i = 1, \dots, M)\}$ , 即

$$P_k = C(Q_{k-1}) \quad (5)$$

为能恰当描述两个点集  $Q_{k-1}$  与  $P_k$  在一组参数下的匹配程度, 需要根据灰度向量  $G_{k-1}$  和图像  $I_k$  的匹配区域定义合适的相似性度量准则。从图像灰度向量的角度描述两个区域的相似性程度通常有两类度量: 一类是相关度量; 另一类是差值度量。均方误差是差值度量的一种, 由于均方误差度量方法直观、严格, 计算简便, 能够较好地两个区域的相近程度做出总体评价, 且以它为目标函数的优化问题有相对成熟的算法, 故采用均方误差度量  $E$ , 其描述目标的 2 维模板  $G_{k-1}$  和图像  $I_k$  中目标区域相近程度表达为

$$E = \sum_{i=1}^M [g_i - I_k(C(X_i', Y_i'))]^2 \quad (6)$$

在最佳匹配状态时, 式(6)的值最小, 故跟踪测量的数学模型为

$$\begin{aligned} \min E &= \min \sum_{i=1}^M [g_i - I_k(C(X_i', Y_i'))]^2 = \\ \min \sum_{i=1}^M [g_i - I_k((\alpha, \beta, \gamma, X_o, Y_o, Z_o), (x_i, y_i))]^2 &= \\ \min \|f(\Phi)\|^2 &\quad (7) \end{aligned}$$

### 2.3 模型求解

式(7)是一个以目标的位置姿态参数向量  $\Phi = [\alpha \beta \gamma X_o Y_o Z_o]^T$  为求解目标的最优化问题。其中  $f(\Phi) = [f_1(\Phi) f_2(\Phi) \dots f_M(\Phi)]^T$ , 一般情况下  $f_i$  是  $\Phi$  的非线性函数。采用 Gauss-Newton 法求解。首先线性化函数向量  $f(\Phi)$ , 然后在一定的初值条件下, 通过线性最小二乘问题的解去逐步逼近上述问题的解<sup>[15]</sup>。下文中也称度量  $E$  为匹配的能量值。

设  $\Phi_k$  在当前图像中目标位置姿态参数向量的准确值  $\Phi$  附近, 则在  $\Phi_k$  确定的参数化模型下, 对目标的成像过程进行仿真可得到模板  $T_{k-1}$  的点集  $Q_{k-1}$  对应的图像点集, 令  $f(\Phi)$  在每个图像点  $(x_i,$

$y_i)$  处, 对位置姿态参数向量  $\Phi$  求偏导数可得  $f(\Phi)$  的 Jacobi 矩阵

$$\nabla f(\Phi) = [\nabla f_1(\Phi) \nabla f_2(\Phi) \dots \nabla f_M(\Phi)]^T \quad (8)$$

式中

$$\nabla f_i(\Phi) = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_k}{\partial x_i} & \frac{\partial I_k}{\partial y_i} \\ \frac{\partial x_i}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_i}{\partial \beta} & \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} & \frac{\partial x_i}{\partial X_o} & \frac{\partial x_i}{\partial Y_o} & \frac{\partial x_i}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_i}{\partial \beta} & \frac{\partial y_i}{\partial \gamma} & \frac{\partial y_i}{\partial X_o} & \frac{\partial y_i}{\partial Y_o} & \frac{\partial y_i}{\partial Z_o} \end{bmatrix} = g_i W \quad (9)$$

式中,  $g_i$  表示第  $i$  个图像点处的梯度向量,  $W$  是式(3)中两式分别对  $\alpha, \beta, \gamma, X_o, Y_o, Z_o$  求偏导数后的偏导数矩阵。利用 Jacobi 矩阵可将  $f(\Phi)$  在真值附近一点  $\Phi_k$  处展开成一阶 Taylor 表达式得

$$f(\Phi) \approx f(\Phi_k) + \nabla f(\Phi_k)^T \Delta \Phi_k \quad (10)$$

从而将式(7)近似转化为线性最小二乘问题

$$\min E \approx \|f(\Phi_k) + \nabla f(\Phi_k)^T \Delta \Phi_k\|^2 \quad (11)$$

由线性最小二乘原理可求得改正向量

$$\Delta \Phi_k = -[\nabla f(\Phi_k)^T \nabla f(\Phi_k)]^{-1} \nabla f(\Phi_k)^T f(\Phi_k) \quad (12)$$

用  $\Delta \Phi_k$  修正  $\Phi_k$  后得  $\Phi_{k+1} = \Phi_k + \Delta \Phi_k$  较  $\Phi_k$  更加接近真值  $\Phi$ , 不断重复式(8)~(12)的过程可在  $k \rightarrow \infty$  时,  $\Phi_k = \Phi$ , 从而实现参数的测量。

实际操作中, 还需要解决两个方面的具体问题:

1) 算法初值的确定, 在跟踪测量过程中, 目标运动状态具有连续性, 因此可将目标在上一帧图像中的位置姿态参数的测量值作为当前帧的迭代初值; 2) 算法的结束条件, 实际计算中迭代次数总是有限的, 因此需要为算法确定一个终止准则, 通常可认为改正向量  $\Delta \Phi_k$  足够小后, 算法已经达到了足够的精度。

跟踪测量算法步骤如下:

1) 利用第  $n$  帧图像中目标位置姿态的测量结果  $\Phi^{(n)}$ , 式(4)和图像插值建立并分割出目标典型区域的平面模板;

2) 令  $k = 0$ , 将  $\Phi^{(n)}$  作为第  $n+1$  帧图像中目标位姿测量初值  $\Phi_k^{(n+1)} = \Phi^{(n)}$ , 并计算能量值  $E_k$ ;

3) 按式(12)得改正量  $\Delta \Phi_k^{(n+1)}$ , 判断  $\Delta \Phi_k^{(n+1)}$  各分量的绝对值是否小于预先设定的小量  $\varepsilon$ , 若小于则转步骤 5);

4) 令  $\Phi_{k+1}^{(n+1)} = \Phi_k^{(n+1)} + \Delta \Phi_k^{(n+1)}$ , 计算能量值  $E_{k+1}$ , 若  $E_{k+1} < E_k$  则令  $k = k + 1$ , 转步骤 3), 否则

转步骤 5)；

5) 输出第  $n + 1$  帧图像的测量结果  $\Phi^{(n+1)} = \Phi_k^{(n+1)}$ 。

以上步骤完成了一帧图像的测量,在每一帧图像中重复上述过程,直至整个序列图像结束。

### 3 实验与分析

通过仿真图像和实际图像,分别对上述测量原理和方法的正确性和实用性进行验证。

#### 3.1 仿真数据实验

利用式(3)定义的成像模型,首先在计算机中生成目标在不同位姿状态下的仿真图像序列。并对该图像序列,使用第 2 节的方法跟踪测量目标的位置姿态参数。实验具体通过下面的步骤验证算法的正确性。

1) 设定仿真摄像机的内外参数,摄像机内参数  $f_x = f_y = 2\ 000\ \text{pixel}$ ,  $x_0 = y_0 = 0$ , 图像分辨率为  $480 \times 480\ \text{pixel}$ , 外参数均设定为 0；

2) 对图 2 所示的立方体目标进行仿真成像,并不断改变立方体位置姿态参数,仿真参数如表 1 所示,部分图像仿真结果如图 3 所示；

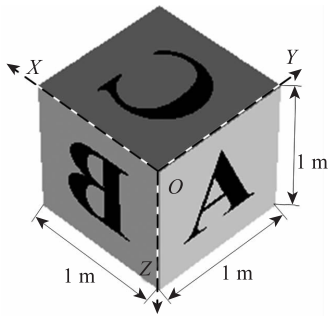


图 2 仿真实验中所使用的立方体

Fig. 2 The cube that is used in the simulated experiment

表 1 立方体目标位姿参数的仿真值

Table 1 Simulated data of cube's attitudes and positions

| 帧号 | $\alpha/(^\circ)$ | $\beta/(^\circ)$ | $\gamma/(^\circ)$ | $X_o/m$ | $Y_o/m$ | $Z_o/m$ |
|----|-------------------|------------------|-------------------|---------|---------|---------|
| 1  | 33.0              | 155.0            | -55.0             | 0.20    | 0.20    | 14.60   |
| 4  | 40.0              | 170.0            | -50.0             | 0.16    | 0.18    | 14.70   |
| 7  | 42.0              | 175.0            | -46.0             | 0.17    | 0.16    | 14.80   |
| 10 | 46.0              | 185.0            | -42.0             | 0.07    | 0.06    | 15.20   |
| 13 | 50.00             | 190.0            | -40.0             | 0.02    | 0.04    | 15.20   |
| 16 | 55.00             | 205.0            | -33.0             | 0.00    | 0.00    | 15.00   |

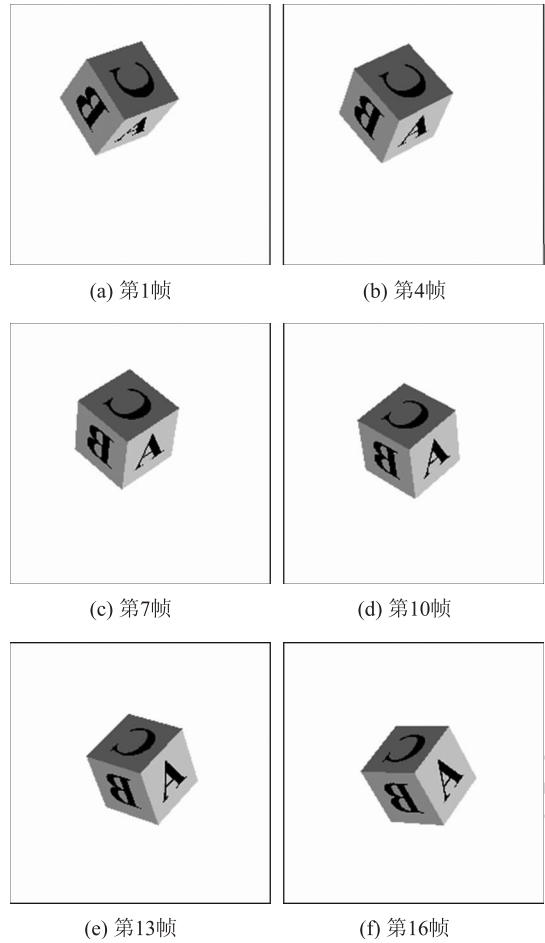


图 3 立方体仿真图像

Fig. 3 Simulated image frames 1,4,7,10,13,16 of the cube

3) 使用基于控制点的方法测量第 1 帧图像中的目标位姿参数,并重建目标平面区域模板(如图 4 所示)。在该过程中,利用式(4)将整幅原图像映射到待跟踪平面后的结果,如图 4(a);由于跟踪算法只利用平面 C 区域的图像信息,因此测量前需要指定平面区间  $X \in [0.0\ \text{m}, 1.0\ \text{m}]$  且  $Y \in [0.0\ \text{m}, 1.0\ \text{m}]$ , 分割得到需要的 C 区域的平面模板,如图 4(b)。

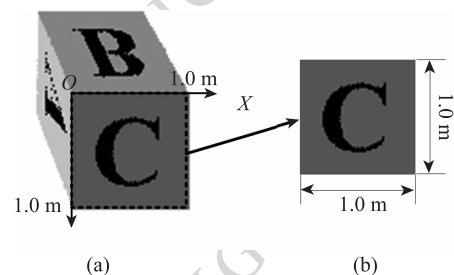


图 4 重建待跟踪区域的平面模板

Fig. 4 Recovery of the planar template of the tracking region

4) 利用从上一帧图像中重建出的平面模板和第2节的方法对当前帧图像进行跟踪测量,并更新目标平面区域模板;

不断重复步骤4)的操作直至序列图像完毕,并将跟踪测量结果与仿真图像的设定值进行比较以验证算法的正确性,如表2所示。

表2 立方体目标位姿参数跟踪测量结果  
Table 2 Measurement results of cube's attitudes and positions

| 帧号 | $\alpha/(^\circ)$ | $\beta/(^\circ)$ | $\gamma/(^\circ)$ | $X_o/m$ | $Y_o/m$ | $Z_o/m$ |
|----|-------------------|------------------|-------------------|---------|---------|---------|
| 1  | 32.7              | 155.3            | -55.0             | 0.20    | 0.20    | 14.72   |
| 4  | 40.1              | 169.9            | -50.5             | 0.17    | 0.18    | 14.77   |
| 7  | 41.9              | 175.3            | -46.9             | 0.18    | 0.16    | 14.88   |
| 10 | 46.1              | 185.4            | -43.0             | 0.08    | 0.06    | 15.35   |
| 13 | 49.6              | 190.3            | -41.5             | 0.04    | 0.04    | 15.36   |
| 16 | 54.4              | 205.6            | -34.1             | 0.01    | -0.01   | 15.07   |

对比表1与表2可知本文的跟踪测量结果与仿真设定值非常接近,角度测量误差小于 $0.6^\circ$ ;位置测量误差优于 $0.02\text{ m}$ 。该结果表明了本文方法的正确性,在理想的状态下具有较高的测量精度。

### 3.2 实测数据实验

首先利用摄影机连续拍摄一平面目标在不同位姿参数下的一组序列图像;然后分别利用本文测量方法和传统的基于控制点的方法分别进行测量,验证算法的实用性,具体实验过程如下:

1) 对所使用的摄像机进行参数标定(标定结果如表3所示,不含畸变系数,下文中所使用的图像均为畸变矫正后的结果),摄像机成像的分辨率为 $1\ 000 \times 750\text{ pixels}$ ,摄像机外参数均设定为0;

表3 摄像机内参数列表  
Table 3 Camera intrinsic parameters

| 参数    | 参数值      |
|-------|----------|
| $f_x$ | 1 024.84 |
| $f_y$ | 1 024.56 |
| $x_0$ | 491.56   |
| $y_0$ | 382.42   |

2) 将一平面飞机目标置于3轴旋转台上,利用标定过的摄像机对该目标进行拍摄,并通过旋转台不断改变平面目标的位姿,部分图像如图5所示;

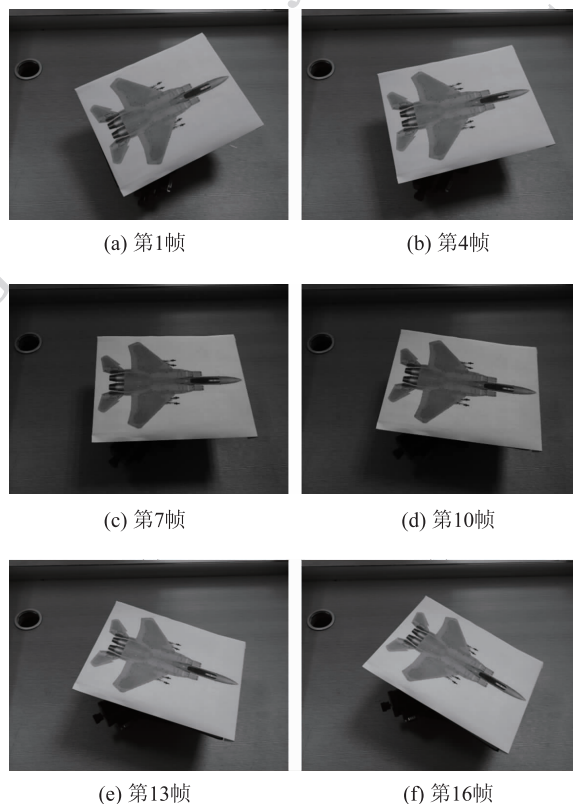


图5 实测目标图像

Fig.5 Real image frames 1,4,7,10,13,16 of a plane

3) 选取4个控制点,利用PNP方法计算各图像中,目标在摄像机坐标系下的位姿参数。目标坐标系及控制点选取情况如图6所示。4个控制点坐标分别

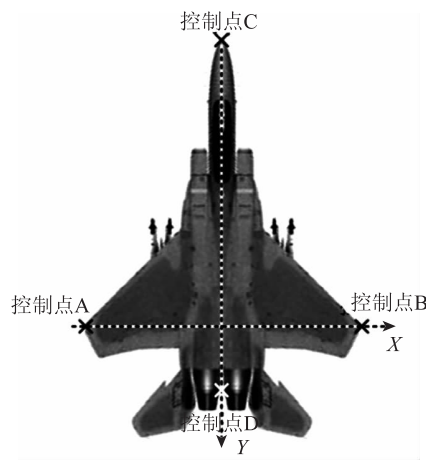


图6 传统测量方法中所选用的控制点  
Fig.6 Control points that are used in the conventional method

为  $A(-89.0\text{ mm}, 0.0\text{ mm})$ ,  $B(89.0\text{ mm}, 0.0\text{ mm})$ ,  $C(0.0\text{ mm}, 143.0\text{ mm})$ ,  $D(-89.0\text{ mm}, 0.0\text{ mm})$ ;

4) 以第1帧图像基于控制点方法的测量结果为基础, 重建平面目标模板; 并利用第3节的方法对后续各帧图像进行跟踪测量;

5) 对比上述两种方法的测量结果, 从各帧图像中测得各参数的绝对差值如图7所示。

图7的实验结果表明本文的跟踪测量结果与PNP方法的测量结果具有相近, 但相比于PNP方法每一帧图像都要在较多人工参与情况下完成, 本文测量方法除第1帧外均自动测量完成, 具有实用性。

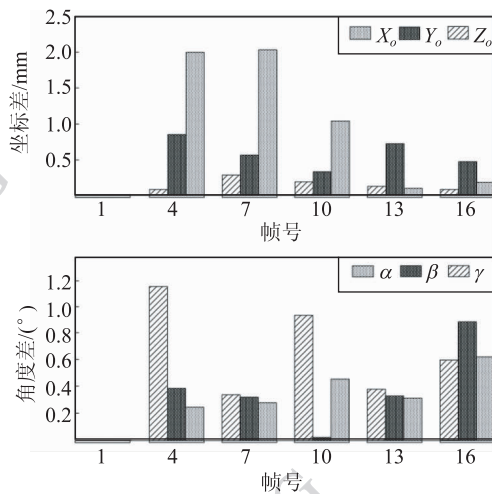


图7 本文方法与传统方法测量结果的绝对差值

Fig. 7 Absolute differences of measurement results that are obtained by our method and conventional method

## 4 结论

序列图像中目标位置姿态测量有以下几个特点: 1) 序列图像数据量大, 人工作业通常难以满足生产实际的需求, 因此需要研究具有较高自动化水平的测量方法; 2) 目标在空间中的位置姿态会发生变化, 而图像只能反应目标的2维投影特性, 因此目标的局部特征容易发生变化, 这为自动识别带来了困难; 3) 序列图像中目标的变化具有一定的连续性, 因此位置与姿态的测量结果也具有相关性。

本文提出的测量方法在相邻两帧图像中, 两次

使用式(1)(3)所确定的刚体目标投影表达式, 首先是在已知目标位置姿态参数的情况下, 从上一帧图像中根据该表达式恢复出目标平面区域的2维模板; 然后在当前帧图像中, 根据该表达式以目标的位置姿态参数为待求量, 进行投影和匹配实现参数测量。本文方法充分利用了人造目标中存在典型的平面结构这一特殊性和序列图像中目标状态的连续性, 对目标进行跟踪测量, 提高了测量的自动化水平。本文方法经过适当的变化后还适用于多个摄像机交会测量的情况。

本文跟踪测量的方法在目标适用性上受到一定限制。方法要求目标上需具有典型的平面区域; 在成像时该区域不被遮挡, 且在图像上能够占有一定的面积。提高方法的适用性是下一步工作的重点。

## 参考文献 (References)

- [1] Hou Z Q, Han C Z. A survey of visual tracking [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(4): 610-617. [侯志强, 韩崇昭. 视觉跟踪技术综述[J]. 自动化学报, 2006, 32(4): 610-617.]
- [2] Zhang Z X, Su G Z, Zhang J Q, et al. Airplane pose measurement from image sequences [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(4): 287-291. [张祖勋, 苏国中, 张剑清, 等. 基于序列影像的飞机姿态跟踪测量方法研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2004, 29(4): 287-291.]
- [3] Kerstin P, Axel P. 3D object category pose from 2D images using probabilistic 3D contour models[C] // OAGM Session 6. Graz, Australia: Joanneum Research, 2011: 172-180.
- [4] Yacov H, Model based pose estimation from uncertain data [D]. Jerusalem: Senate of the Hebrew University, 2006.
- [5] Martin L G, David J F, Nikos P. Model-based 3D hand pose estimation from monocular video[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(9): 1-14.
- [6] Wang X W, Ma J, Chen J, et al. Direction vector method of angle bisector lines for measuring aircraft's 3D attitude [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 369-376. [王习文, 马军, 陈娟, 等. 飞机三维姿态测量的角平分线方向向量法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 369-376.]
- [7] Yan L, Bin K, Fei Z, Automatic feature extraction of pose-measuring system based on geometric invariants[C] // Proceedings of International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering. Paris, France: Atlantis Press, 2007: 177-183.
- [8] Yu Q F, Sun X Y, Chen G J. A new method of measure the

- pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(2): 15-19. [于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. *国防科技大学学报*, 2000, 22(2): 15-19.]
- [9] Duan F Q, Wu F C, Hu Z Y. Pose determination and plane measurement using a trapezium[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(3): 223-231.
- [10] Wu Y H, Hu Z Y. PnP problem revisited [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2006, 24(1): 131-141.
- [11] Vincent L, Francese M N, Pascal F. EPnP: An accurate  $O(n)$  solution to the PnP problem [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.
- [12] Lu C P, Gregory D H, Eric M. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2008, 22(6): 610-622.
- [13] Daniel. F. D, Larry S D. Model-based object pose in 25 lines of code[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, 15(1-2): 123-141.
- [14] Gabriel R, Claudio M, Enric C. Vision-based grasp tracking for planar objects [J]. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics* 2008, 38(6): 844-849.
- [15] Gregory D. H, Peter N. B. Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(10): 1025-1039.