

doi: 10.3788/gzxb20144305.0512003

基于共面特征点的单目视觉位姿测量误差分析

霍炬^{1,2}, 崔家山², 王伟兴²

(1 哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150001)

摘要:为了克服单目视觉测量中景深信息缺失的问题,运用改进的两段式迭代算法,对刚体位姿测量解算模型进行了优化.给出了特征标靶最优化布局,理论分析了标靶尺寸大小、标靶基线长度及特征圆点大小和解算准确度的关系.实验结果表明,优化的特征标靶布局、较大的特征标靶基线长度及较小的特征圆点靶标能够提高测量解算准确度.该研究对提高实际测量系统解算准确度具有一定的理论指导意义.

关键词:位姿测量;单目视觉;景深估计;共面特征点;坐标统一化

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)05-0512003-7

Error Analysis of Monocular Visual Position Measurement Based on Coplanar Feature Points

HUO Ju^{1,2}, CUI Jia-shan², WANG Wei-xing²

(1 Electrical Engineering Department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2 Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to overcome the lack of depth information in monocular vision measurement, an improved two-stage iterative algorithm was proposed to optimize the posture and attitude measurement models. The characteristics of the target layout optimization were given. The relationships between the calculating accuracy with the target size, baseline length and characteristics of the target dot size were analyzed theoretically. Experimental results show that optimizing the layout of the target characteristic, the larger the length of the baseline and smaller characteristics of the target dots can improve the measurement target solver accuracy. The actual research has a certain guiding theoretical significance to improve the practical measurement system calculation accuracy.

Key words: Pose measurement; Monocular vision; Depth estimation; Coplanar feature points; Coordinate unification

OCIS Codes: 120.0120; 330.5000; 110.2970; 110.4153; 150.5670

0 引言

基于视觉的位姿测量具有测量准确度高、测量速度快、测量范围大以及对于测量环境复杂多变适应性等特点,成为目前使用较为广泛的运动参量非接触式测量方法^[1-3].相比较于双目视觉测量和多目视觉测量,单目视觉测量作为视觉测量中相对简单便捷的测

量手段,具有系统工作构成简单、摄像机标定简单等优点,同时避免了双目视觉和多目视觉中测量视场范围小、视觉传感器立体匹配困难等缺点^[4-6].

透视 N 点 (Perspective-N-Point, PNP) 问题由 Fisher 和 Bolles 于 1981 年提出^[7],其基础数学模型是基于小孔成像模型的建立,是一种理想情况下的模型.文献[8-10]研究了不同特征点对应的 PNP 问题解的

基金项目:国家自然科学基金委创新研究群体科学基金(No. 61021002)、中央高校基本科研业务费专项资金(No. HIT.NSRIF.2014019)和重点实验室开放基金(No. HIT.KLOF.2013081)资助

第一作者:霍炬(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为机器视觉与半实物仿真. Email: torch@hit.edu.cn

通讯作者:崔家山(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为视觉测量和视觉导航. Email: cuijiashan@gmail.com

收稿日期:2013-09-23; **录用日期:**2013-12-18

<http://www.photon.ac.cn>

情况及其求解算法,其中也包含如何确定被测目标上所需安置特征点的数目和相对位置关系^[11-14],以获取特征点三维坐标来解算被测目标位姿.文献[15-16]主要的研究对象集中于P3P、P4P、P5P等问题上,其中中间的数字表示运动目标物体上所安放的特征点个数.

视觉位姿测量有多种方法,基于模型的单目视觉是其中的典型方法之一.本文应用P4P几何约束条件结合奇异值分解的整体最小二乘法计算位姿初值,代入改进的两段式迭代算法进行相对位姿及景深信息的优化,并对实验制作的相应尺寸的特征标靶、布局最优化问题进行了实际测量实验与验证分析,给出了提高系统测量解算准确度的方法.

1 算法描述

1.1 坐标统一方法

刚体位姿参量测量系统主要原理是利用三轴转台作为运动发生装置模拟目标的位姿变化,视觉采集系统对目标位姿变化过程中特征点的图像进行实时采集并存储,然后对位姿图形进行处理,最后解算目标位姿.为达到目标位姿解算目的,需要建立各测量坐标系进行换算,见图1.

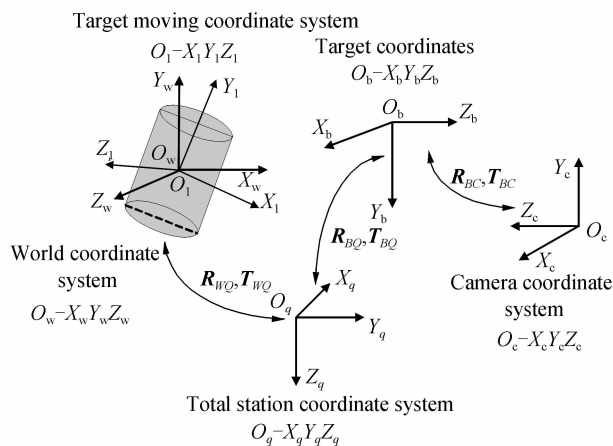


图1 系统测量坐标系

Fig.1 Diagram of the measuring coordinate system

目标动坐标系相对于世界坐标系的位姿角即为目标转台位姿值,而求解此相对关系需要已知摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系,再通过所拍摄的位姿图像进行求解可得目标动坐标系与摄像机坐标系转换关系,这样就可以得到目标动坐标系相对于世界坐标系的位姿.设特征点在目标动坐标系下的坐标值为 P , P_w 为世界坐标系下的坐标值.整个系统坐标之间的关系为

$$\begin{cases} P = R \times P_w + T \\ R = R_c R_{BC} R_{BQ}^{-1} R_{wQ} \\ T = R_c R_{BC} R_{BQ}^{-1} (T_{wQ} - T_{BQ}) + R_c T_{BC} + T_c \end{cases} \quad (1)$$

式中 R 、 T 分别为目标动坐标系相对于世界坐标系之间

旋转矩阵以及平移矢量.

1.2 改进的两段迭代算法解算模型

目标坐标系下特征点坐标为 $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$,在摄像机坐标系下为 $S'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ $i=1,2,3,4$,由摄像机成像原理可知

$$S'_i = R S_i + T \quad (i=1,2,3,4) \quad (2)$$

式中,目标坐标系相对于摄像机坐标系的平移向量 $T=(t_x, t_y, t_z)^T$ 和旋转矩阵 R .以摄像机光心为模型中心点发出射线,该射线同时穿过特征像点并指向目标特征点,如图2,其射线单位矢量 v_i 为

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i^2 + y_i^2 + f^2)}} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ f \end{pmatrix} \quad (i=1,2,3,4) \quad (3)$$

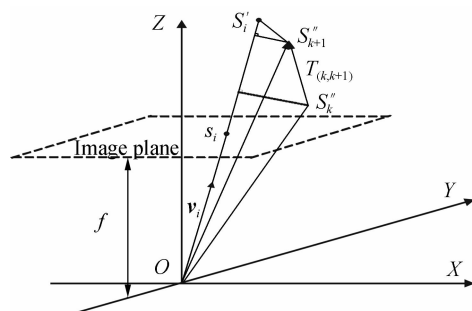


图2 空间目标物像共线误差示意

Fig.2 Schematic of the target object collinear error

根据共线条件原理, S_i 和 S'_i 同时存在于射线单位矢量 v_i 上,在摄像机坐标系中特征点的坐标为

$$S'_i = r_i v_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (4)$$

式中,将特征点到投影中心的距离定义为景深因子 r_i .射线单位矢量 v_i 上的特征点投影即为其自身,因此可以得出共线方程为

$$S'_i = v_i^T S'_i v_i = v_i^T (R S_i + T) v_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (5)$$

在任何位姿测量系统中,测量的 S'_i 坐标与实际上的坐标值有一定误差,可以利用该误差,由式(3)和式(5)定义函数为

$$e^2(R, T) = \sum_{i=1}^4 [(R S_i + T) - v_i^T (R S_i + T) v_i]^2 \quad (6)$$

根据式(6)在已知旋转矩阵 R 时,对 T 进行偏导求解,并令其偏导等于零, $T(R)$ 可由旋转矩阵 R 表示为

$$T(R) = (4I - \sum_{i=1}^4 (v_i v_i^T))^{-1} \sum_{i=1}^4 (v_i v_i^T - I) R S_i \quad (7)$$

由式(2)和式(5)可知,空间各个特征点的景深信息可由旋转矩阵表示为

$$d_i(R) = v_i^T (R S_i + T(R)) \quad (8)$$

在完成对最优平移向量 $T(R)$ 和各特征点景深值 $d_i(R)$ 的计算后,利用各个特征点景深值对特征点在摄像机坐标系下坐标值 S'_i 进行重构,即

$$S'_i(R) = d_i(R) v_i = v_i^T (R S_i + T(R)) v_i \quad (9)$$

根据摄像机坐标系与世界坐标系转换矩阵 R_{cw} 和平移矢量 T_{cw} 分别重构特征点三维世界坐标值,建立特

征点世界坐标系下坐标误差目标函数,计算误差.进而式(6)可以表示为

$$e^2(\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{T}^{(k)}, \mathbf{R}_{cw}, \mathbf{T}_{cw}, d_i^k) = \sum_{i=1}^4 [\mathbf{R}_{cw} d_i^{(k)} \mathbf{v}_i - \mathbf{R}_{cw} (\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{S}_i + \mathbf{T}^{(k)}) + 2\mathbf{T}_{cw}]^2 \quad (10)$$

式中,旋转矩阵 \mathbf{R} 满足约束 $\mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}$.

最后利用 Umeyama 解析算法求解旋转矩阵第 $k+1$ 次迭代值 $\mathbf{R}^{(k+1)}$ 为

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^4 [(\mathbf{R}\mathbf{S}_i + \mathbf{T}(\mathbf{R})) - \mathbf{S}_i'(\mathbf{R})]^2 \quad (11)$$

算法具体步骤为:

1) 初始化旋转矩阵 $\mathbf{R}^{(k)}$ ($k=1$), 由式(5)计算逆投影线单位向量 \mathbf{v}_i ($i=1, 2, \dots, N$);

2) 计算最优平移向量

$$\mathbf{T}^{(k)} = (\mathbf{N}\mathbf{I} - \sum_{i=1}^N (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T))^{-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T - \mathbf{I}) \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{S}_i;$$

3) 更新景深值 $d_i^{(k)} = \mathbf{v}_i^T (\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{S}_i + \mathbf{T}^{(k)})$, 重构特征点 $\mathbf{S}_i^{(k)} = d_i^{(k)} \mathbf{v}_i$;

4) 采用 Umeyama 解析算法求解式(11)给出的相

对方位解算问题,给出旋转矩阵 $\mathbf{R}^{(k+1)}$;

5) 计算误差

$$e^2(\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{T}^{(k)}, d_i^{(k)}) = \sum_{i=1}^N [d_i^{(k)} \mathbf{v}_i - (\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{S}_i + \mathbf{T}^{(k)})]^2$$

$$i=1, \dots, N;$$

6) 如果误差小于预定的误差阈值 E_T , 即 $e^2(\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{T}^{(k)}, \{d_i^{(k)}\}) < E_T$, 则进入第 8) 步, 否则, 置 $k=k+1$;

7) 若迭代次数少于最大迭代数, 返回到第 2) 步, 否则进入第 8) 步;

8) 迭代结束, 输出结果.

通过两阶段迭代算法, 更新景深和旋转矩阵, 结合摄像机坐标系相对世界坐标系转换矩阵 \mathbf{R}_{cw} 与平移矢量 \mathbf{T}_{cw} , 得出最优的景深 d_i 、目标坐标系与世界坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R}_{ow} 和平移向量 \mathbf{T}_{ow} . 根据目标坐标系与世界坐标系之间的变换关系, 定义俯仰角 α 、偏航角 β 、滚转角 γ , 依照目标转台实际机械转动特性以及实验环境所限制, 可知两坐标系之间的三轴转动顺序为先 Y 轴, 后 Z 轴, 再 X 轴, 因此变换矩阵的具体形式为

$$\mathbf{R}_{ow} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) \\ -\cos(\gamma)\sin(\alpha)\cos(\beta) + \sin(\gamma)\sin(\beta) & \cos(\gamma)\cos(\alpha) & \sin(\alpha)\sin(\gamma)\cos(\beta) + \cos(\beta)\sin(\gamma) \\ \cos(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) + \sin(\beta)\cos(\gamma) & -\cos(\alpha)\sin(\gamma) & -\sin(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) + \cos(\gamma)\cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

在已知 \mathbf{R}_{ow} 的条件下, 可得目标相对与世界坐标系位姿变换为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{R(3,2)}{R(3,3)}\right) \\ \beta = \arctan\left(\frac{-R(3,1)}{\sqrt{R^2(1,1) + R^2(2,1)}}\right) \\ \gamma = \arctan\left(\frac{R(2,1)}{R(1,1)}\right) \end{cases} \quad (13)$$

2 测量准确度影响因素分析

2.1 布局优化

选用 P4P 方法求解刚体位姿参量, 理论上只要 4 个特征点在同一平面组成四边形, 即可通过 PNP 算法得到各点相对于摄像机光心的景深信息. 基于 P4P 问题中 4 个特征点有约束的自由组合布局, 特征点所成四边形的形状对于位姿解算准确度的影响情况以及解算准确度最高的特征点最优分布成为所要解决的问题. 在这里只考虑直角梯形情况下特征点最优化分布问题.

特征点标靶直角梯形分布如图 3. 图中 P_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为成直角梯形时 4 个特征点, P_5 为特殊情况长方形时虚拟特征点, 定义 $\angle P_1 P_4 P_3 = \alpha$ 为布局影响因子.

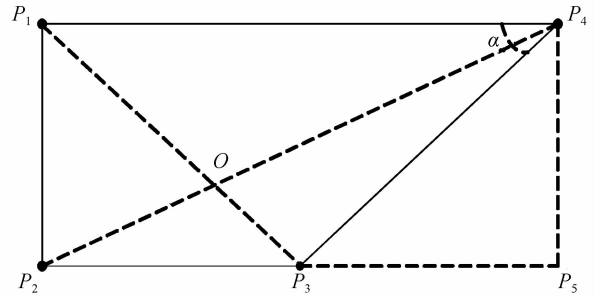


图 3 特征点标靶直角梯形分布

Fig. 3 Target feature dots right angle trapezoid distribution

根据固定边长以及四边形分布要求, 可得限制条件: $L_{12} = P_1 P_2 = 100$, $L_{14} = P_1 P_4 = 200$ (长度单位 mm), $\angle P_1 P_4 P_3 = \alpha$ ($26.565^\circ < \alpha < 180^\circ$). 那么根据特征点在摄像机坐标系下的坐标值可以求解出实际解算的边长长度, 当角度 α 发生变化时, 两者差值存在一定的变化, 取最小误差值的角度作为最优值, 求解方程得出最优 α 值, 此时的特征点分布即为直角梯形条件下最优分布.

$$\Delta E_1 = (C_1 - C_2) - P_1 P_2 = C_1 r_1 / M_1 - C_2 r_2 / M_2 - 100 \quad (14)$$

式中 $C_i = (x_i y_i f)$ $i=1 \sim 4$ 为特征点像点在摄像机坐标系下的坐标值, $M_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}$ ($i=1 \sim 4$). 将实验所得一组参量代入式(14), 化简可得

$$\Delta E_1 = 32.05864476 \frac{2 \tan(\alpha) - 1}{2 \tan(\alpha)} - 231.43424 \quad (15)$$

令 $\Delta E_1 = 0$, 可求的最优布局影响因子 $\alpha \approx 175.4^\circ$.

将基于此优化布局的标靶应用到测量实验中, 将测量所得误差数据与同条件下长方形布局实验数据进

行比较, 得出两者测量实验误差值如表 1. 从表 1 中可知, 特征标靶直角梯形最优布局的测量准确度要比长方形布局高, 说明特征标靶布局优化有助于提高测量解算准确度.

表 1 特征标靶布局位姿角解算误差表

Table 1 Characteristics of target layout pose angle solver error table

Target feature points distributed manner	Rectangle			Rectangular trapezoid		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
Target posture angle/(°)						
Minimum error	0.009	0.152 8	0.185 2	0.006	0.102 3	0.159 8
Maximum error	0.211 3	1.269 1	1.425 6	0.245 9	0.909 6	1.003 2
RMS error	0.124 8	0.762 2	0.894 2	0.126 9	0.508 2	0.639 5

2.2 特征标靶基线与测量准确度的关系

特征标靶作为测量解算位姿参量的重要组成部分, 其特有参量的变化一定会在不同程度上影响测量解算准确度. 特征点组成任意形状的四边形都可以基于此使用 PNP 问题进行解算, 接下来给出不同尺寸下的标靶与测量解算准确度的关系.

在本文中, 为方便实验, 应用长方形分布的圆点特征标靶进行实验, 设计三种尺寸下的特征标靶: $(100 \times 200) \text{mm}^2$ 、 $(160 \times 280) \text{mm}^2$ 、 $(240 \times 360) \text{mm}^2$ 如图 4.

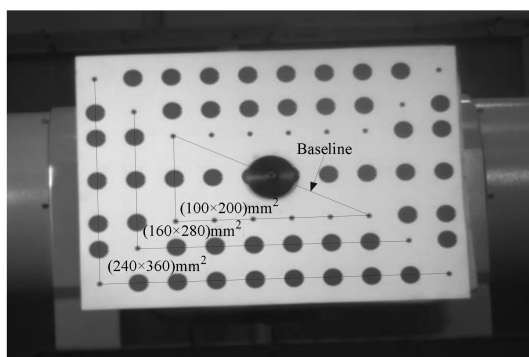
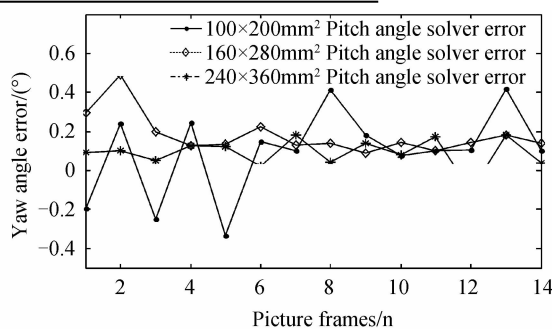


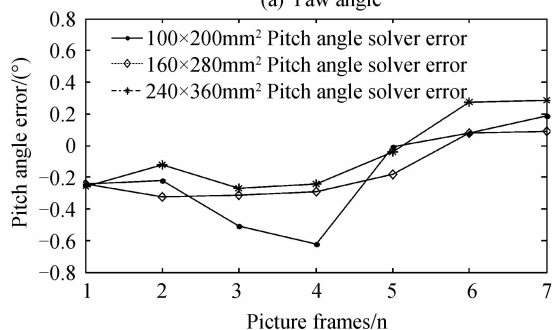
图 4 圆点特征标靶图

Fig. 4 Characteristics of dot target

取长方形对角线作为比较基线, 分析特征点基线变化时对于解算准确度的影响. 通过实验比较不同尺寸在不同角度转动情况下的解算误差值变化情况如图 5.



(a) Yaw angle



(b) Pitch angle

图 5 角度解算误差示意图

Fig. 5 The angle calculating error map

对实验结果数据进行分析得出系统测量最小解算误差值、最大解算误差值和均方根误差值如表 2. 从表 2 中可见, 系统测量结算误差值随着特征基线的增大而减小, 基于均方根误差值, 可以拟合出基线长度与位姿解算误差之间的曲线关系如图 6.

表 2 基线长度与测量解算误差比较

Table 2 Baseline length and the calculating error comparison table

Baseline/mm	223.606 8		322.490 3		432.666 2	
	Yaw	Pitch	Yaw	Pitch	Yaw	Pitch
Target posture angle/(°)						
Minimum error	0.039 8	0.067 3	0.031	0.047 1	0.0459	0.0109
Maximum error	0.627 9	0.513 0	0.493 8	0.498 7	0.400 8	0.312 6
RMS error	0.386 2	0.291 2	0.299 7	0.246 9	0.265 1	0.168 4

从图 6 基线长度与位姿角解算误差拟合曲线可知, 基线(矩形对角线)增加一倍, 目标位姿角度解算误

差值大约减小一倍, 两者呈线性关系, 因此增大特征标靶基线长度可以提高测量解算准确度.

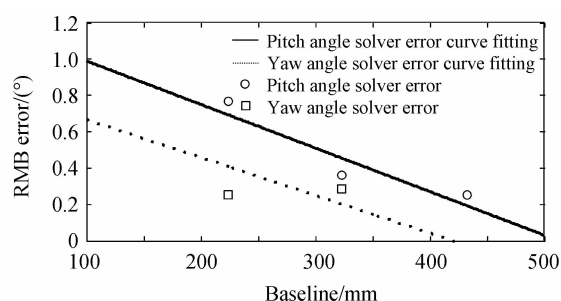


图6 基线长度与位姿解算误差关系拟合图

Fig. 6 The baseline and position calculation error fitting chart

2.3 椭圆化问题与测量准确度的关系

特征圆点标靶在随着转台转动时,标靶平面会与摄像机平面存在一定角度,会使特征点存在不同程度上椭圆化问题,使得应用算法提取特征点中心坐标值存在偏差,影响对刚体位姿的测量解算.在此处以偏航角度为 20° 为例进行分析特征点偏航椭圆化问题,如图7.

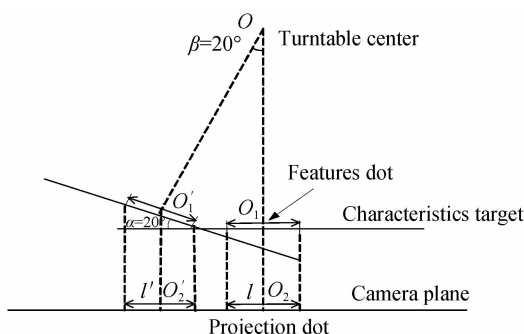


图7 偏航椭圆化解算示意

Fig. 7 Schematic diagram of yaw elliptic resolve calculation

基于特征圆点在摄像机平面投影原理,根据图7可得, $l=20\text{ mm}$, $l'=20 \times \cos 20^\circ = 18.79385\text{ mm}$.因此可得椭圆化偏差为 $\Delta l=l-l'=1.20615\text{ mm}$,在本次实验中可求得一个像素为 0.7474 mm ,因此可知转台单方向偏航 20° 时椭圆化理论误差计算值为 1.6138 个像素.

试验取图4中对转台偏航 20° 位姿图像进行处理求取误差值:取60个点作为解算目标点,对于目标点应用均方根算法可得像素 u 的平均误差值为 1.4905 个像素,像素 v 的平均误差值 1.1873 个像素.图像中虽为偏航单方向的平动,但是特征标靶存在一定的倾

斜,因此两者平方求解,可得综合误差值 1.9056 个像素,相比较理论计算值 1.6138 个像素,存在 0.2918 个像素的差值,分析原因是由于对特征点进行提取像素坐标时存在误差造成的,因此说明特征圆点椭圆化问题理论误差值与实验误差值相符.

2.4 椭圆化问题与测量准确度的关系

由于应用特征圆点作为实验标靶,会存在椭圆化问题.为了减小椭圆化问题所带来的准确度影响,可以对特征圆点标靶进行一定的改进,寻求减小特征点椭圆化的方法.从理论上分析可知,特征圆点半径的减小对于从位姿图像提取特征点中心坐标值的准确度有所提高.

选取特征圆点半径为 20 mm 、 5 mm ,针对两种直径规格标靶进行实验,获取数据进行分析解算,以偏航角求取为例,解算误差如图8,具体解算误差值分析如表3.

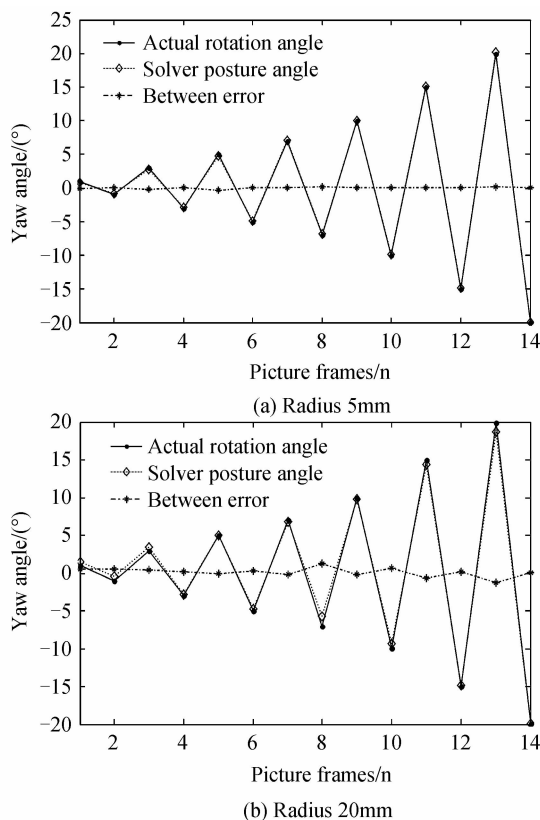


图8 不同半径偏航角解算误差图

Fig. 8 The different radius of yaw calculate error map

表3 特征圆点半径与位姿角解算误差比较表

Table 3 Characteristics of dot radius and posture angle calculating error comparison table

Features dot radius	5 mm			20 mm		
	Target posture angle/($^\circ$)	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch
Minimum error	0.027 9	0.039 8	0.067 3	0.031 2	0.112 9	0.908 7
Maximum error	0.781 0	0.627 9	0.513 0	0.874 5	1.294 4	1.109 8
RMS error	0.357 2	0.386 2	0.291 2	0.415 4	0.864 1	0.602 7

由图8、表3可知,当特征圆点半径越小,物体位姿角度解算误差值越小;特征圆点半径的缩小会减小这种椭圆化的程度,提高特征点圆心点坐标提取准确度,这验证了之前的分析。

由图8、表3可知,当特征圆点半径由20 mm减小到5 mm时,偏航角测量解算误差减小了50%,因此减小特征圆点半径可以减小特征点椭圆化程度,提高位姿测量解算准确度。

3 三轴联动测量解算实验及数据分析

为了提高每次测量准确度得到高准确度的实验数据,简化实验步骤应在实验中避免三轴转动耦合,多选取转台按照单方向转动进行实验测量。但在不掺杂其他因素的前提下分析问题显然是不全面的,因此目标转台进行三轴联动时位姿参数的测量解算实验是十分必要的。三轴联动不同位姿示意图如图9,通过圆形靶标在图像中的坐标变化,解算出转台的转动角度,与转

台的实际转动角度进行比较,分析解算误差。

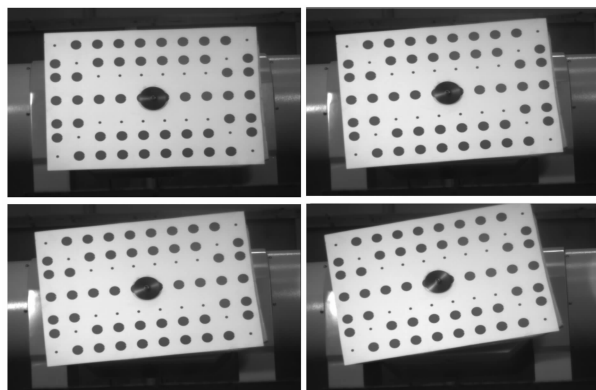


图9 三轴联动不同位姿示意

Fig. 9 The different axis linkage pose diagram

选取特征靶标尺寸为 (240×360) mm²、特征圆点半径为5 mm的实验条件,实验测量解算位姿角误差图如图10,具体实验误差分析值如表4。

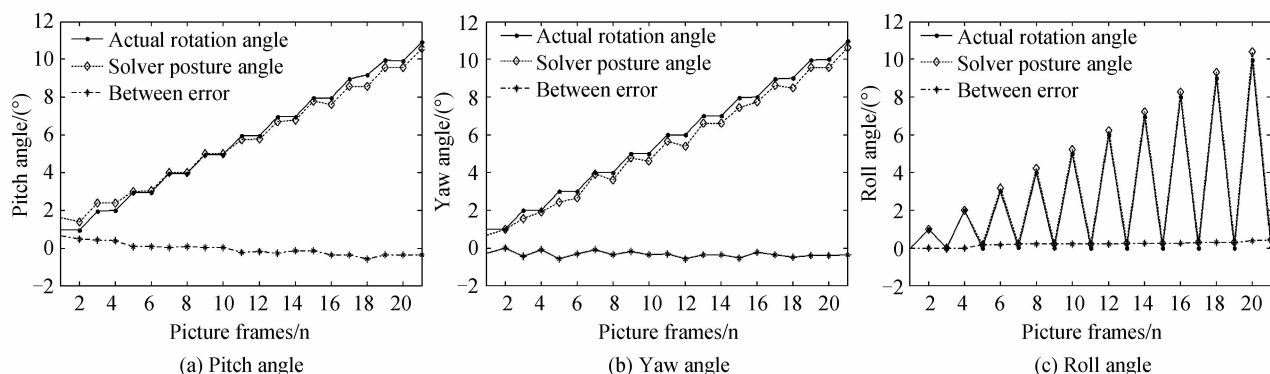


图10 三轴联动位姿角解算误差分布图

Fig. 10 Three axis linkages pose angle solver error distribution map

表4 三轴联动实验误差分析

Table 4 Three-axis experimental error analysis table

Target posture angle (Unit: /°)	Roll	Pitch	Yaw
Minimum error	0.014 3	0.086 9	0.070 1
Maximum error	0.343 4	0.848 1	0.737 1
RMS error	0.243 9	0.555 2	0.518 6

由图10和表4可知,在三轴联动条件下,系统滚转、俯仰、偏航三轴RMS误差值分别为0.243 9、0.555 2、0.515 6,取三轴误差上限可知系统测量解算准确度在0.555°水平上,偏航角与俯仰角位姿角误差基本一致,这与实际实验理论分析基本相符。

4 结论

为了明确各坐标系之间的转换关系,提出实验坐标统一方法,应用改进的两段式迭代算法优化刚体位姿测量解算模型,对圆点特征靶标进行位姿测量实验,给出了圆点靶标的最优化布局,依据实验数据研究了特征点基线长度与测量准确度的关系、特征圆点直径

及椭圆化问题,并应用转台三轴联动测量实际解算误差验证了理论分析。

参考文献

- [1] XU Wen-fu, LIANG Bin, LI Cheng, *et al.* The approach and simulation study of the relative pose measurement between space-crafts based on stereo vision [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, **30**(4): 1421-1428.
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.
- [2] ZHAO Ru-jin, ZHANG Qi-heng, XU Yong, *et al.* A method of measuring attitude based on inclined angle of the line between feature points[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 320-324.
赵汝进, 张启衡, 徐智勇, 等. 一种基于特征点间线段倾角的姿态测量方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 320-324.
- [3] PENG Xiao-dong, ZHOU Si-zhong, LIU Bo, *et al.* Application of ellipse of inertia in measuring the object's 3D [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 568-573.
彭晓东, 周泗忠, 刘波, 等. 惯量椭圆法在单站光测目标三维姿态测量中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 568-573.
- [4] CHAO Zhi-chao, FU Si-hua, JIANG Guang-wen, *et al.* Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3):

0312001.
晁志超,伏思华,姜广文,等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0312001.
- [5] ZHU Ji-gui, LI Yan-jun, YE Sheng-hua, *et al.* Study on single camera simulation stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943-948.
郝继贵,李艳军,叶声华,等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 943-948.
- [6] MENG Qing-li, WANG Feng, ZHANG Zhi-min, *et al.* Error analysis of a method for measuring flying object's 3D pose[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1172-1175.
孟庆利,王锋,张志敏,等. 利用光测影像测量飞行目标姿态方法的误差分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1172-1175.
- [7] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[C]. ACM, 1981, 381-395.
- [8] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, **81**(2): 155-166.
- [9] ZHANG S J, CAO X B, ZHANG F, *et al.* Monocular vision-based iterative pose estimation algorithm from corresponding feature points[J]. *Science China-Information Sciences*, 2010, **53**(8): 1682-1696.
- [10] GAO X S, HOU X R, TANG J, *et al.* Complete solution classification for the perspective-three-point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(8): 930-943.
- [11] HU Z Y, WU F C. A note on the number of solutions of the noncoplanar P4P problem[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(4): 550-555.
- [12] NISTER D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(6): 756-770.
- [13] LEE P Y, MOORE J B. Gauss-Newton-on-manifold for pose estimation [J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2005, **1**(4): 565-587.
- [14] ANSAR A, DANILIDIS K. Linear pose estimation from points or lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(5): 578-589.
- [15] TANG J L, CHEN W S, WANG J. A novel linear algorithm for P5P problem [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, **205**(2): 628-634.
- [16] CHEN Peng, HU Guang-da, LIU Xiao-jun. Camera pose estimation based on virtual control points [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(11): 33-34.
陈鹏,胡广大,刘晓军. 基于虚拟控制点的像机姿态测量算法[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 33-34.