

# 单站光测图像确定空间目标三维姿态

唐自力<sup>1,2</sup> 马彩文<sup>1</sup> 刘波<sup>1</sup> 单金玲<sup>1</sup> 陈良红<sup>2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国华阴兵器试验中心, 华阴 714200)

**摘要** 充分利用空间目标的几何先验知识, 提出了一种基于特征点提取的单站经纬仪等光测设备确定空间目标三维姿态的迭代算法, 避免了多站图像的立体匹配, 并在此基础上用 vc++ 进行了模拟仿真. 实验表明: 该方法准确度较高, 结果稳定, 应用价值高.

**关键词** 姿态测量; 图像处理; 三维姿态; 单站定姿; 特征提取; 先验知识

**中图分类号** TP317.4      **文献标识码** A

## 0 引言

在靶场试验中, 飞行器姿态测量至关重要. 飞行器的俯仰角、偏航角、攻角、旋转角等姿态参量是反映飞行器飞行状态的重要运动参量, 获得这些参量对分析飞行器的运动状态, 以及气动参量辨识等有着重要的价值.

目前国内各靶场试验基地, 一般采用电影经纬仪、高速摄像机等光测设备对目标进行跟踪拍摄, 获取图像. 通过图像特征提取、信息处理获得目标的运动轨迹、速度和加速度. 这种将目标当作质点而非刚体的方法无法得到目标的三维姿态信息. 为了获得三维姿态, 有人尝试将交会后的目标首尾两点(指长形目标)连接起来作为目标中轴线, 从而得到姿态信息. 这种方法有以下两个缺点: 1) 由于利用的图像信息很少, 所以准确度很低; 2) 当不同经纬仪获得目标的不同部位, 如一台获得目标的头部而另一台获得目标的尾部时, 这种方法将由于没有对应图像点而完全失效. 文献[3]提出了一种利用两站或多站图像获得目标三维姿态的中轴线方法, 这种方法原理简单、测量准确度高、对图像质量要求低, 但要求至少有两站以上的目标图像, 涉及到立体匹配. 在实际试验中, 有时只有一个站点的经纬仪(摄像机)记录有清晰可用的目标图像, 而其它站点的目标图像不可用或根本没有捕捉到目标. 因此, 研究用单站图像确定目标的三维姿态具有重要的实际应用价值. 针对靶场光测图像目标多为圆柱体形状, 如火箭、导弹等, 在这种应用背景下, 本文提出了一种从单站光测图像确定空间目标三维姿态的迭代算法, 从而克服了多视觉方式对应点匹配上的问题.

## 1 大地坐标系与摄影机像面坐标系的关系

如图1所示  $xyz$  为大地坐标系, 原点  $o$  为发射点, 正北方向为  $z$  轴,  $y$  轴为垂直方向,  $x$  轴为垂直于  $z$  轴的水平方向.  $uvw$  是摄影机像面坐标系, 原点  $o'$  为像面中心,  $w$  轴是视轴方向,  $u, v$  分别为像面十字丝的水平 and 垂直方向.  $T$  为光学系统的中心(光心),  $o'T = nf$  ( $f$  为镜头焦距). 把弹体在水平面上的投影与正北方向的夹角定义为偏航角  $\theta$ , 顺时针方向为正; 弹体与水平面的夹角定义为俯仰角  $\varphi$ , 向上为正.

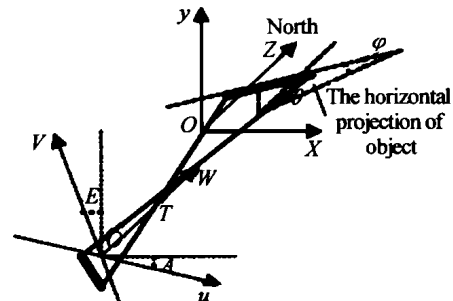


图1 大地坐标系 XYZ 与摄影机像面坐标系 UVW 的设定  
Fig. 1 The earth reference frame and the camera reference frame

## 2 单站定姿的理论依据

目标位姿测量的首要条件是处理出各特征点在摄影机像面坐标系下的三维坐标. 设第  $i$  个特征点  $p_i$  在摄影机像面坐标系中的坐标为  $(u_i, v_i)$ , 在大地坐标系中的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 则有:  $l = CS$ , 其中,

$$l = \begin{bmatrix} U_i k_i \\ V_i k_i \\ k_i \end{bmatrix} \text{ 表示摄影机像面坐标, } k_i \text{ 是一个系数,}$$
$$C = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} & c_{03} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix} \text{ 为变换矩阵, } S = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 表示大}$$

地坐标系坐标. 由此可见,空间某一点可以唯一确定像面上的一点. 将  $k_i$  消去,可以得到下面的形式

$$\begin{cases} (u_i c_{20} - c_{00})x_i + (u_i c_{21} - c_{01})y_i + (u_i c_{22} - c_{02})z_i = c_{03} - u_i c_{23} \\ (v_i c_{20} - c_{10})x_i + (v_i c_{21} - c_{11})y_i + (v_i c_{22} - c_{12})z_i = c_{13} - v_i c_{23} \end{cases} \quad (1)$$

这是一个直线方程,它表示像面上的一点对应空间的一条直线,因此仅仅已知某一特征点的图像坐标是无法计算其空间坐标的. 为求解特征点的三维空间坐标,一种方式是将特征点间的位置关系作为一种约束条件,构成单站定位系统. 另一种方式是引入两个摄像机,同一特征点分别在两个摄像机中成像,得到两个空间直线方程,其交点坐标即为该特征点的空间坐标,从而构成双站交会定位系统.

对于单站定位来说,如果在目标上取  $n$  个特征点,则其空间坐标共有  $3n$  个未知数. 根据式(1)可以得到  $2n$  个线性方程. 根据特征点间的距离约束可以得到  $c_n^2$  个 2 次方程. 当  $n \geq 3$  时,  $c_n^2 \geq n$  时,方程数不少于未知数的个数. 最直接的求解方法是将  $c_n^2$  个 2 次方程组成的方程组作为约束方程组,对  $2n$  个线性方程组求解. 这实际上是一个约束条件下的线性规划问题.

所以理论上讲,只要在目标上取 3 个以上的点,并利用它们之间的距离约束,就可以进行单站测姿定位了.

### 3 算法原理

#### 3.1 目标特征点的选取

图 2 为经纬仪侧视时所成的像,选取图像边缘的三个特征点  $A, B, C$ . 这三个特征点始终在目标的轮廓上,所以不存在遮挡的问题. 太阳光是从无穷远处照射过来的,可以假设是一组平行光照向目标,



图 2 目标特征点选取  
Fig. 2 The choice of the mark of object

那么  $B, C$  两点不管是在目标尾部圆周的任何点,它们的连线必然经过圆心,所以  $BC$  的长度就是目标的直径. 它们到目标顶部  $A$  点的距离  $AB, AC$  就可按下式计算.

$$l' = AB = AC = \sqrt{(d/2)^2 + l^2} \quad (2)$$

式中:  $d$  为导弹弹径,  $l$  为导弹弹长

#### 3.2 算法步骤

本文提出了一种适合 3 个特征点的求解方法. 该方法避开规划问题,从视觉物理意义入手,通过简

单的约束迭代,求解出各特征点的三维空间坐标. 具体求解过程为:

1) 由大地测量可得摄像机光心  $p_c$  (即光敏面中心)的三维坐标向量  $w_c = (x_c, y_c, z_c)$ ;

2) 计算光心到各特征点的单位向量  $a_i = (\cos E_i \sin A_i, \sin E_i, \cos E_i \cos A_i)$ , 这里的  $A_i, E_i$  分别是指经纬仪的视轴指向各特征点时的方位角和俯仰角,假设目标特征点的像在像面坐标系中的脱靶量为  $(\Delta u_i, \Delta v_i)$ ,那么就可得到

$$\begin{cases} \Delta A = \frac{\Delta u_i}{f \cos E} + \frac{\Delta u_i \Delta v_i}{f^2} \tan E \\ \Delta E = \frac{\Delta v_i}{f} - \frac{\Delta u_i^2 + \Delta v_i^2}{2f^2} \tan E \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_i = A + \Delta A \\ E_i = E + \Delta E \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $A, E$  是经纬仪指向目标的方位角和俯仰角,  $\Delta A, \Delta E$  是脱靶量误差带来的方位和俯仰指向误差;

3) 计算光心到各特征点的距离  $R_i$ ;

4) 求出光心指向各特征点的空间向量  $s_i = R_i a_i + w_c$ .

该算法的关键在于距离  $R_i$  的求解,这里运用了特征点间的距离约束和迭代求解方法. 计算原理如图 3 所示,其中  $p_i$  为空间的特征点,即  $p_1, p_2, p_3$  分别代表图 2 中的  $A, B, C$  三个特征点,  $p_c$  为摄像机光心,  $R_i$  为特征点  $p_i$  到光心的距离,  $d_{ij}$  为特征点  $p_i$  与  $p_j$  间的距离,  $\alpha_1$  是  $p_c p_2$  与  $p_c p_3$  的夹角,  $\alpha_2$  是  $p_c p_2$  与  $p_c p_1$  的夹角,  $\alpha_3$  是  $p_c p_1$  与  $p_c p_3$  的夹角,且  $\alpha_1 = \arccos(a_2 \cdot a_3)$ ,  $\alpha_2 = \arccos(a_1 \cdot a_2)$ ,  $\alpha_3 = \arccos(a_1 \cdot a_3)$  其中符号  $\cdot$  是求向量内积. 由此可得  $R_i$  的求解过程.

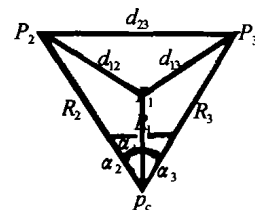


图 3 光心到特征点距离计算原理图  
Fig. 3 The figure of calculating the distance of the focus of optics and the mark of object

首先给定一个  $R_1$  的初值,这个初值的选择将根据具体实现算法时逼近真值的方式而定. 如果采用逐次递增的搜索方式,那么  $R_1$  要选的尽量小,至少要小于目标与站点的最小距离,否则搜索失败. 另外一种左右逼近法,这种方法不管  $R_1$  选值如何,最后都能得到一个理想的结果,但是运算量也是比较大的.  $R_1$  选定之后,因为  $d_{12}$  和  $d_{13}$  已知,可以通过几何关系分别求出  $R_2$  和  $R_3$ . 从而求出  $P_2$  与  $P_3$  间的

计算距离  $d'_{2,3}$ , 将其与实际距离  $d_{2,3}$  相比较, 根据比较结果调整  $R_i$  的初值. 重复上面的迭代过程, 直至  $|d'_{2,3} - d_{2,3}| < \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  值是一个由测量准确度决定的正数,  $\varepsilon$  值越小, 匹配越好, 准确度就越高. 这样就可以得到光心到特征点  $A, B, C$  的距离  $R_1, R_2, R_3$ , 并通过步骤(4)解得  $s_1, s_2, s_3$ , 设:  $s_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ , 那么光心指向目标尾部中心的向量为  $s_0 = (X_0, Y_0, Z_0) = ((X_2 + X_3)/2, (Y_2 + Y_3)/2, (Z_2 + Z_3)/2)$ , 于是就可以得到目标中轴线的姿态角

$$\begin{cases} \theta = f(R_1, R_2, R_3, A, E, \Delta U_1, \Delta V_1, \Delta U_2, \Delta V_2, \Delta U_3, \Delta V_3) = \arctan [(X_1 - X_0)/(Z_1 - Z_0)] \\ \varphi = f(R_1, R_2, R_3, A, E, \Delta U_1, \Delta V_1, \Delta U_2, \Delta V_2, \Delta U_3, \Delta V_3) = \arctan [(Y_1 - Y_0)/(\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2})] \end{cases} \quad (5)$$

以上算法仅适用于对目标进行侧视时像面上  $A, B, C$  三点能够明显区分的情况, 同时也是最常见的一种情况. 另外在实际的姿态测试中, 还有两种特殊的视角情况, 迎头和尾追现象, 也就是弹轴和经纬仪视轴平行时  $A, B, C$  三点无法区分的情况. 鉴于安全和靶场布站方案的实际情况, 对目标迎头这种情况可以不考虑, 而追尾现象还是有可能发生的, 在这种情况下, 目标的姿态角就是经纬仪的指向角度.

### 4 计算机仿真实验与准确度分析

目标姿态测量准确度受多方面因素影响, 除了本身目标判读误差以外, 还要考虑十字丝倾斜误差、垂直轴垂直度、水平轴与垂直轴垂直度的影响, 同时还有目标尺寸测量误差以及算法本身所带来的误差. 如果按目前测试需求对姿态准确度  $1^\circ$  的要求来衡量, 那么单项指标一般要求达到总准确度的  $1/5$ , 也就是  $0.2^\circ$ .

#### 4.1 经纬仪指向误差对测姿准确度的影响

从以下误差来源分析中可以看出, 大部分的系统误差都是比较固定的. 只有脱靶量判读误差将根据探测器件和光学系统选择的不同, 误差大小也不同.

误差来源	静态误差	仪器调平误差(1')
		十字丝标定误差(5')
		水平轴误差(2'')
		脱靶量判读误差(后述)
		编码器分辨误差(2'')
	动态误差	日照温差变形误差(0.44')
		风力变形误差(1')
		轴系动态变形误差(2'')
		像移误差(0.024')

现假设摄像机光敏面尺寸为  $16.9 \text{ mm}$ , 像元大小为  $0.011 \text{ mm}$ , 采用焦距  $f = 1500 \text{ mm}$  的光学镜头. 如果不进行细分, 那么系统自动判读脱靶量误差最大就是一个像元大小, 即  $\Delta u = 0.011 \text{ mm}$ ,  $\Delta v = 0.011 \text{ mm}$ . 通过式(3)算得  $\Delta A, \Delta E$ . 表1为经纬仪不同俯仰角下脱靶量判读误差对系统测角准确度的影响.

表1 脱靶量判读误差对系统测角准确度的影响

$E/^\circ$	0	15	30	45	60	75
$\Delta A/''$	0.0015	0.0016	0.0017	0.0021	0.0030	0.0058
$\Delta E/''$	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

除脱靶量判读误差之外的测角误差综合为

$$\sigma_j = \sqrt{1^2 + 5^2 + 0.033^2 + 0.033^2 + 0.033^2 + 0.44^2 + 1^2 + 0.024^2} = 5.215'$$

把以上误差和脱靶量判读误差引入测姿算法可得到表2. 从表2中可以看出经纬仪指向误差对整个姿态角的计算影响不大, 基本上控制在  $0.2^\circ$  到  $0.3^\circ$  之间.

表2 经纬仪指向误差对测姿准确度的影响

目标中轴线姿态理论值  $\theta = 76.211^\circ, \varphi = 31.257^\circ$

经纬仪俯仰角/ $^\circ$	引入测角误差之前的目标中轴线姿态/ $^\circ$	引入测角误差之后的目标中轴线姿态/ $^\circ$	测角误差对结果的影响/ $^\circ$			
$E$	$\theta$	$\varphi$	$\theta'$	$\varphi'$	$\Delta\theta''$	$\Delta\varphi''$
3.393	76.362	31.225	76.495	31.198	0.133	0.027
12.100	76.347	31.212	76.466	31.197	0.119	0.015
30.397	76.859	30.852	77.119	30.772	0.260	0.080
42.376	87.508	19.738	87.733	19.608	0.225	0.130
62.207	92.890	-3.629	93.100	-3.800	0.210	0.171
74.490	89.110	-17.532	89.309	-17.611	0.199	0.079

#### 4.2 目标尺寸测量误差对测姿准确度的影响

从表3数据可知, 要想得到  $0.2^\circ$  的单项测姿准确度, 目标尺寸测量只要满足一个到两个毫米的准确度就可以了, 这个标准就目前的长度测量工具而言都能满足.

表3 目标尺寸测量误差对测姿准确度的影响

目标中轴线姿态理论值  $\theta = 76.211^\circ, \varphi = 31.257^\circ$

目标尺寸测量误差/m	目标中轴线姿态/ $^\circ$		绝对误差/ $^\circ$	
$\Delta L$	$\theta$	$\varphi$	$\Delta\theta$	$\Delta\varphi$
0.000	76.243	31.239	0.031	0.018
0.001	76.084	31.330	0.127	0.073
0.002	76.001	31.377	0.210	0.120
0.003	75.950	31.406	0.261	0.149
0.005	75.899	31.435	0.312	0.178
0.01	75.869	31.452	0.342	0.195

#### 4.3 迭代计算经纬仪到目标特征点的距离时引入的误差对测姿准确度的影响

在4.1、4.2分析中已经知道经纬仪指向误差和

目标尺寸测量误差对测姿准确度的影响非常小, 那么测姿准确度就主要受经纬仪到目标特征点的距离计算误差的影响了. 设经纬仪到目标特征点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的距离为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ . 经纬仪指向  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的方位角、

俯仰角分别为  $A_1$ 、 $E_1$ 、 $A_2$ 、 $E_2$ 、 $A_3$ 、 $E_3$ . 目标中轴线的姿态角分别为  $\theta$ 、 $\varphi$ . 下面通过式(6)、(7)建立  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  到  $\theta$ 、 $\varphi$  的误差传递模型, 这里忽略了经纬仪指向误差和目标尺寸测量误差.

$$\begin{aligned}
 f_1(R_2, R_3, A_2 - A_1, A_3 - A_1, E_1, E_2, E_3) &= 2R_2 \cos E_1 \cos E_2 \sin(A_2 - A_1) + 2R_3 \cos E_1 \cos E_3 \sin(A_3 - A_1) \\
 f_2(R_1, R_3, A_1 - A_2, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3) &= 2R_1 \cos E_1 \cos E_2 \sin(A_1 - A_2) + R_3 \cos E_1 \cos E_3 \sin(A_2 - A_3) \\
 f_3(R_1, R_2, A_1 - A_3, A_3 - A_2, E_1, E_2, E_3) &= 2R_1 \cos E_1 \cos E_3 \sin(A_1 - A_3) + R_2 \cos E_2 \cos E_3 \sin(A_3 - A_2) \\
 f_4(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3) &= 4R_1^2 \cos^2 E_1 + R_2^2 \cos^2 E_2 + R_3^2 \cos^2 E_3 - 4R_1 R_2 \cos E_1 \\
 &\quad \cdot \cos E_2 \cos(A_1 - A_2) - 4R_1 R_3 \cos E_3 \cos E_1 \cos(A_1 - A_3) + 2R_2 R_3 \cos E_3 \cos(A_2 - A_3) \\
 \left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \theta}{\partial R_1} &= \frac{f_1(R_2, R_3, A_2 - A_1, A_3 - A_1, E_1, E_2, E_3)}{f_4(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)} \\
 \frac{\partial \theta}{\partial R_2} &= \frac{f_2(R_1, R_3, A_1 - A_2, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)}{f_4(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)} \\
 \frac{\partial \theta}{\partial R_3} &= \frac{f_3(R_1, R_2, A_1 - A_3, A_3 - A_2, E_1, E_2, E_3)}{f_4(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)}
 \end{aligned} \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_5(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3) &= 4R_1 R_2 \cos E_1 (\cos E_1 \sin E_2 - \cos E_2 \sin E_1 \cos(A_1 - A_2)) + \\
 &\quad 4R_1 R_3 \cos E_1 (\cos E_1 \sin E_3 - \sin E_1 \cos E_3 \cos(A_1 - A_3)) + 2R_2^2 \cos E_2 (\cos E_2 \sin E_1 - \cos E_1 \sin E_2 \cos(A_1 - \\
 &\quad A_2)) + 4R_2 R_3 \cos E_3 \sin E_1 \cos E_2 \cos(A_2 - A_3) - 2R_2 R_3 \cos E_1 (\cos E_2 \sin E_3 \cos(A_1 - A_2) + \cos E_3 \sin E_2 \cdot \\
 &\quad \cos(A_1 - A_3)) + 2R_3^2 \cos E_3 (\cos E_3 \sin E_1 - \cos E_1 \sin E_3 \cos(A_1 - A_3))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_6(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3) &= 4R_1 R_3 \cos E_3 \cos E_1 \sin E_2 \cos(A_1 - A_3) + 2R_1 R_2 \cos E_2 \cdot \\
 &\quad (\cos E_1 \sin E_2 \cos(A_1 - A_2) - \sin E_1 \cos E_2) + 4R_1^2 \cos E_1 (\cos E_2 \sin E_1 \cos(A_1 - A_2) - \cos E_1 \sin E_2) - 2R_1 R_3 \cdot \\
 &\quad \cos E_2 (\sin E_3 \cos E_1 \cos(A_1 - A_2) + \cos E_3 \sin E_2 \cos(A_2 - A_3)) + R_2 R_3 \cos E_2 (\cos E_2 \sin E_3 - \cos E_3 \cdot \\
 &\quad \sin E_2 \cos(A_2 - A_3)) + R_3^2 \cos E_3 (\cos E_2 \sin E_3 \cos(A_2 - A_3) - \cos E_3 \sin E)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_7(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3) &= 4R_1 R_2 \cos E_2 \cos E_1 \sin E_3 \cos(A_1 - A_2) + 2R_1 R_3 \cos E_3 \cdot \\
 &\quad (\cos E_1 \sin E_3 \cos(A_1 - A_3) - \sin E_1 \cos E_3) + 4R_1^2 \cos E_1 (\cos E_3 \sin E_1 \cos(A_1 - A_3) - \cos E_1 \sin E_3) - \\
 &\quad 2R_1 R_2 \cos E_3 (\sin E_2 \cos E_1 \cos(A_1 - A_3) + \cos E_2 \sin E_1 \cos(A_3 - A_2)) + R_2 R_3 \cos E_3 (\cos E_3 \sin E_2 - \\
 &\quad \cos E_2 \sin E_3 \cos(A_2 - A_3)) + R_2^2 \cos E_2 (\cos E_3 \sin E_2 \cos(A_2 - A_3) - \cos E_2 \sin E_3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_8(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3) &= 4R_1 R_2 \cos E_2 \cos E_1 \sin E_3 \cos(A_1 - A_2) + 2R_1 R_3 \cos E_3 \cdot \\
 &\quad (\cos E_1 \sin E_3 \cos(A_1 - A_3) - \sin E_1 \cos E_3) + 4R_1^2 \cos E_1 (\cos E_3 \sin E_1 \cos(A_1 - A_3) - \cos E_1 \sin E_3) - \\
 &\quad 2R_1 R_2 \cos E_3 (\sin E_2 \cos E_1 \cos(A_1 - A_3) - \cos E_2 \sin E_1 \cos(A_3 - A_2)) + R_2 R_3 \cos E_3 (\cos E_3 \sin E_2 - \cos E_2 \cdot \\
 &\quad \sin E_3 \cos(A_2 - A_3)) + R_2^2 \cos E_2 (\cos E_3 \sin E_2 \cos(A_2 - A_3) - \cos E_2 \sin E_3) = 4R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 - 4R_1 R_2 \cdot \\
 &\quad (\cos E_1 \cos E_2 \cos(A_1 - A_2) + \sin E_1 \sin E_2) - 4R_1 R_3 (\cos E_1 \cos E_3 \cos(A_3 - A_1) + \sin E_1 \sin E_3) + 2R_2 R_3 \cdot \\
 &\quad (\cos E_2 \cos E_3 \cos(A_3 - A_2) + \sin E_2 \sin E_3) \cdot
 \end{aligned}$$

$$\sqrt{4R_1^2 \cos^2 E_1 + R_2^2 \cos^2 E_2 + R_3^2 \cos^2 E_3 - 4R_1 R_2 \sin E_1 \sin E_2 - 4R_1 R_3 \sin E_1 \sin E_3 + 2R_2 R_3 \sin E_2 \sin E_3}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \varphi}{\partial R_1} &= \frac{f_5(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)}{f_8(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)} \\
 \frac{\partial \varphi}{\partial R_2} &= \frac{f_6(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)}{f_8(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)} \\
 \frac{\partial \varphi}{\partial R_3} &= \frac{f_7(R_1, R_2, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)}{f_8(R_1, R_1, R_3, A_1 - A_2, A_1 - A_3, A_2 - A_3, E_1, E_2, E_3)}
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

偏航角准确度

$$\sigma_\theta = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial R_1}\right)^2 \sigma_{R_1}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R_2}\right)^2 \sigma_{R_2}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R_3}\right)^2 \sigma_{R_3}^2} \quad (8)$$

俯仰角准确度

$$\sigma_\psi = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \psi}{\partial R_1}\right)^2 \sigma_{R_1}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial R_2}\right)^2 \sigma_{R_2}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial R_3}\right)^2 \sigma_{R_3}^2} \quad (9)$$

通过对上述误差传递函数的分析和计算,可知经纬仪指向特征点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的方位角之差、经纬仪到目标的距离和经纬仪的俯仰角是影响姿态角测量准确度的主要因素. 而前两个因素都可以归结到目标在像面上成像的大小对测姿准确度的影响. 仿真实验得到表 4. 其中所选光学镜头焦距  $f = 1500$  mm, CCD 象元尺寸为  $0.011 \times 0.011$  mm.

表 4 目标在像面上成像的大小对测姿准确度的影响  
目标中轴线姿态理论值  $\theta = 76.211^\circ$ ,  $\varphi = 31.257^\circ$

经纬仪到目标的距离/m	经纬仪指向 $A$ 、 $B$ 方位角之差/ $^\circ$	目标在像面上的成像尺寸/象元	目标中轴线姿态/ $^\circ$		绝对误差/ $^\circ$	
$S$	$A_1 - A_2$	$n$	$\theta$	$\varphi$	$\Delta\theta$	$\Delta\varphi$
3446	0.042	100	81.070	31.150	4.859	0.107
3250	0.045	106	76.679	31.126	3.468	0.081
2978	0.049	116	77.422	31.226	1.210	0.031
1775	0.107	254	76.766	31.057	0.555	0.201
1132	0.116	276	76.409	31.204	0.197	0.054

分析表 4 数据可知,经纬仪指向不同特征点的方位角之差越小,经纬仪到目标距离越远,测姿误差越大,经分析可得,这两项指标综合反映的正是目标在像面上成像的大小对测姿准确度的影响,表 4 数据显示,只有当目标在像面上成像的尺寸大于 3 mm 时,测姿误差才会小于  $0.2^\circ$ ,由此可得,如果选用电视靶面尺寸为 16.9 mm,像元大小为  $0.011$  mm  $\times$   $0.011$  mm,以及焦距为 1500 mm 的光学镜头进行单站测姿,目标成像尺寸必须大于三个毫米,也就是说目标在像面上的成像尺寸不能小于 270 个象元数.

表 5 经纬仪不同俯仰角下测姿准确度的变化  
目标中轴线姿态理论值  $\theta = 76.211^\circ$ ,  $\varphi = 31.257^\circ$

经纬仪俯仰角/ $^\circ$	目标中轴线姿态/ $^\circ$		绝对误差/ $^\circ$	
$E$	$\theta$	$\varphi$	$\Delta\theta$	$\Delta\varphi$
16.274	76.332	31.210	0.121	0.048
20.125	76.412	31.159	0.201	0.098
30.298	76.756	30.918	0.544	0.339
30.727	77.231	30.610	1.019	0.647
31.054	77.595	30.316	1.384	0.891
34.204	80.851	27.848	4.640	3.412

分析表 5 数据可知,当经纬仪仰角大于  $20^\circ$  时,此项指标造成的测姿误差大于  $0.2^\circ$ ,可以说当经纬仪仰角大于  $20^\circ$  时,此方法得到的姿态角基本上不可取,同时由表 2 可知在这个俯仰角范围内,经纬仪指向误差对测姿准确度的影响也小于  $0.2^\circ$ . 所以在用此方法进行单站定姿时,经纬仪俯仰角不能翘得太高,在布站和制定测试方案时务必要考虑这个因素.

以上仿真实验,  $\varepsilon$  值均取为 0.0001 m,结果证明

当  $\varepsilon$  取到 0.0001 m 时,测姿准确度比较理想,结果也是比较稳定的,如果取值更小,系统测量准确度提高不了多少,但是处理时间明显增长.

## 5 结束语

本文提出的用单站光测图像确定空间目标三维姿态的迭代算法具有下列突出的优点:

1) 通过单站的光测图像就可以确定目标的空间三维姿态参量,避免了多站图像的立体匹配,具有更大的灵活性和实用性;

2) 从图像轮廓上提取特征点,可以事后根据成像情况有针对性的选取. 相对常规的在目标上作标志的方法,可以避免遮挡的问题;

3) 在不增加任何新的外测设备的条件下,仅改变对现有光测图像的判读分析方法,就得到了目标三维空间姿态的重要参量,具有重要的社会效益和经济效益.

## 参考文献

- 郝颖明,朱枫,欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法. 中国图像图形学报,2002,12(12):1247~1251  
Hao Y M, Zhu F, Ou J J. *Journal of Image and Graphics*, 2002,12(12):1247~1251
- 马颂德,张正友. 计算机视觉. 北京:科学出版社,1998,3(1):14~20  
Mang S D, Zhang Z Y. *Computer Vision*. 1998. Beijing: Science Press, 1998,3(1):14~20
- 于其峰,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. 国防科技大学学报,2000,22(2):15~19  
Yu Q F, Sun X Y, Chen G J. *Journal of University of National Defence Technology*, 2000,22(2):15~19
- 于其峰,孙祥一,邱志强. 从单站光测图像确定空间目标三维姿态. 光学技术,2002,28(1):77~82  
Yu Q F, Sun X Y, Qiu Z Q. *Optical Technique*, 2002,28(1):77~82
- 姚志雄,何俊华,邓年貌,等. 狭缝式高速摄影机胶片的计算机判读. 光子学报,2002,31(5):633~636  
Yao Z X, He J H, Deng N M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(5):633~636
- 何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理. 人民邮电出版社,2001,4(1):394~438  
He B, Ma T Y, Wang Y J, et al. *Visual C++ Digital Image Processing*. People Posts and Telecom Press, 2001,4(1):394~438

## A Approach of Determination of Object's 3D Pose From Mono-view

Tang Zili<sup>1,2</sup>, Ma Caiwen<sup>1</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>, Shan Jinling<sup>1</sup>, Chen Lianghong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

<sup>2</sup> China Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200

Received date: 2003-11-06

**Abstract** A matching approach basing on the character adopting of determination of object's 3D pose from mono-view using the knowledge of space-objects figuration is presented, avoiding stereo matching, and using the language of VC++ ,simulating experiment is carried. The synthetic and real application show the approach can give precision and stable results.

**Keywords** Pose measurement; Image processing; 3D pose; Mono-view; Character adopting; Knowledge



**Tang Zili** was born in 1975 and graduated from Xiantan University in 1997 with his Bachelor of Engineering. At the same time, he became a graduate of Graduate School of CAS in Communication & Information System. Now he is doing his research job in image processing and target identification at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS.