

测量点目标运动参数的单目运动轨迹交会法

于起峰*, 尚洋, 周剑, 张小虎, 李立春

国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073

* E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

收稿日期: 2009-03-01; 接受日期: 2009-05-20

国家自然科学基金(批准号: 60904084)资助项目

摘要 提出了一种理论体系完备的求解点目标三维运动的摄像测量方法——单目运动轨迹交会法。通过对目标运动轨迹进行参数化描述, 将运动像机观察运动目标的系列视线, 与目标的参数化运动轨迹进行交会, 从而唯一确定了目标的三维轨迹和速度等运动参数。该方法不同于常规点交会的三维交会测量模式, 不增加测距等辅助设备或改造成像光路, 有效解决了传统单目无法测量点目标三维运动的技术难题, 扩展了摄像测量和计算机视觉的一类应用范围, 可用于多种运动平台对运动目标的被动观测任务。

关键词

运动平台

单目

点目标

运动轨迹交会

1 引言

在摄像测量和计算机视觉中, 双目可以通过交会测量确定任意形式目标的三维几何信息。对于体目标, 单目也可以根据目标表面特征之间的约束关系求解目标运动参数或根据目标实际尺度确定其相对距离。而对于没有结构特征的点目标, 如果不增加辅助约束, 单目只能确定目标方位, 而无法确定目标距离, 即无法定位^[1,2]。而如果摄像机运动可控, 在两个已知方位对静止点目标进行拍摄后可以解算目标

的空间位置, 如图 1(a), 这相当于双目交会定位。但如果点目标在运动, 单目两次成像时目标不在同一空间位置, 则无法进行点交会, 如图 1(b)。因此如果不增加其它约束条件, 运动单像机不能对运动点目标的运动参数进行测量。

然而, 实际测量任务中常有一类机动平台单目对运动目标进行三维观测的问题, 例如在机器人对抗赛、机器人足球赛等应用中, 机器人在运动过程中要实时测量出对方机器人或足球等运动目标的三

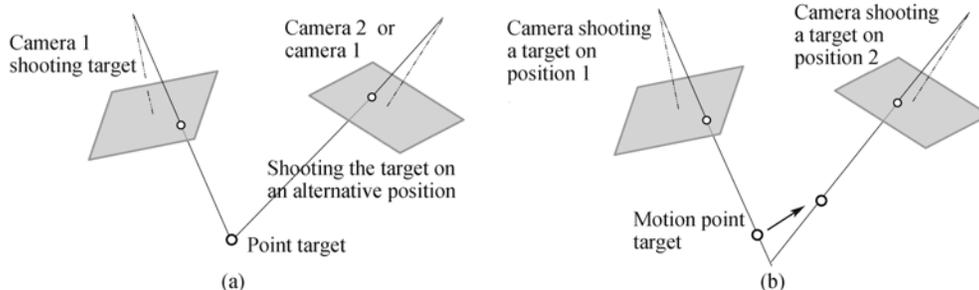


图 1 单目在不同方位拍摄可以交会定位静止点目标而不能定位运动点目标

(a) 单目在不同方位拍摄求解静止点目标位置相当于双交会定位; (b) 单目在不同方位拍摄运动点目标无法进行点交会定位

引用格式: 于起峰, 尚洋, 周剑, 等. 测量点目标运动参数的单目运动轨迹交会法. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(12): 1919—1927
Yu Q F, Shang Y, Zhou J, et al. Monocular trajectory intersection method for 3D motion measurement of a point target. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(12): 3454—3463, doi: 10.1007/s11431-009-0239-5

维运动状态, 包括沿摄像机轴向的距离信息在内的三维轨迹以及速度和加速度等; 在长航时飞行实验测试中, 需要在运动平台上对目标的运动参数进行观测; 在空间机器人、水下机器人等各种应用中, 也有机器人在运动中观测运动目标的需求. 在这些需求中, 常常由于摄像平台的规格尺寸相对于目标的距离是小量, 即使安装两台摄像机, 由于基线太短, 也基本相当于进行单目观测. 同时, 在目标尺寸比较小, 或者并不关心其姿态的情况下, 可以将其作为点目标, 并且不需要进行目标表面特征提取、匹配等复杂和有难度的工作. 这种运动平台单目测量运动目标三维运动参数, 是一大类典型的测量需求, 而现有摄像测量中的常规测量方法不能适用.

目前单目视觉测量点目标运动参数的解决方法基本分为两类: 第一类方法是借助其它辅助手段得到目标距离信息, 结合单目定向信息得到点目标空间三维位置. 目前最多采用的是为单目视觉系统增加激光测距仪等辅助测距设备, 得到目标的距离信息, 从而对目标定位^[3-7]. 第二类方法是将单目视觉系统改造为虚拟双目视觉系统, 进行双目交会测量. 通常借助平面镜、三角棱镜等, 通过成像光路设计, 将单像机镜像为一对虚拟像机, 将对目标的实际成像分解成两部虚拟像机的虚拟成像, 从而将单像机测量系统等效为双像机测量系统^[8-10].

本文作者在文献[11]中初步提出和验证了将点目标运动用时间多项式来描述, 为求解提供约束关系, 并与成像共线方程联立, 从运动单像机求解点目标运动参数的方法. 相比于其它方法, 该方法不需增加测距设备或设计复杂光路. 但文献[11]还只是初步的工作, 更深入的研究表明, 其中的概念和方法理论都还相当不完备, 特别是没有注意到方法的应用受限制的情况. 而这一轨迹交会比常规点交会的原理和求解都要复杂, 为了得到确定解, 必须对摄像机运动做一些特殊的要求, 排除某些运动方式, 才能使本原理和方法实用化.

本文通过更深入、全面地研究, 明确提出了视线-轨迹交会的概念, 揭示了其区别于传统的视线点交会概念的本质: 将观察视线与参数化的目标运动轨迹进行交会, 确定轨迹参数, 从而求解目标位置和运动参数. 同时本文给出了两种形式的求解算法: 直接

从单目运动轨迹交会基本原理得出的视线-轨迹交会算法和空间关系上更直观的虚拟视线交会算法. 特别重要的是, 本文对运动轨迹交会法有确定解的条件进行了讨论, 得出对摄像机运动的要求, 并列举了两类得不到确定解的情况. 通过对基本原理、解算方法和使用条件的全面研究, 本文提出了一种理论体系较完备的求解点目标三维运动的摄像测量方法——单目运动轨迹交会法, 解决了单目被动测量点目标三维运动这一类视觉测量难题, 将有广泛、重要的应用前景.

2 单目运动轨迹交会法基本原理和视线-轨迹交会法

2.1 问题描述

如图 2, 世界坐标系为 $W-XYZ$, 对应于不同拍摄时刻 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$, 像机光心位置为 $C_i (X_{C_i}, Y_{C_i}, Z_{C_i})$, 目标的位置为 $P_i (X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})$, 目标成像点为 $p_i (x_{P_i}, y_{P_i})$, 像机光心与目标的连线(观察视线)为 l_i . 在本问题中我们设定, 像机内参数已知, 像机运动可控, C_i 在世界坐标系中的坐标, 以及像机的姿态角度都为已知, 提取目标像点坐标后, 即可确定观察视线 l_i . 需要求解目标运动参数, 包括 P_i 在世界坐标系中的坐标.

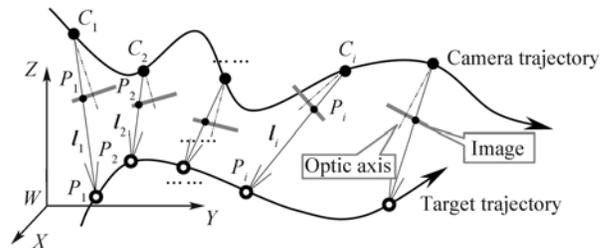


图 2 运动单目测量点目标运动参数的问题描述

2.2 单目运动轨迹交会法基本原理

从原理上讲, 在没有引入额外约束的情况下, 基于某时刻的单幅图像, 只能根据光心和像点连线确定点目标的方向, 即确定观察视线, 而无法得到距离信息, 也就无法定位. 为了从运动平台单像机测量点目标三维运动, 必须增加约束条件.

在实际自然时间空间中, 真实目标的运动必然是连续有序的, 因此在短时间内, 通常满足或近似满足一定的运动规律. 如果将这一运动规律用参数化

模型来描述, 就得到了除成像关系外对于目标运动的约束条件. 对于不同的应用背景, 可采用不同的运动模型. 我们假设点目标的运动轨迹可以用时间的参数化多项式来近似描述, 例如匀速直线运动, 或者加速二次曲线运动等. 将这一约束条件与目标成像关系联合, 就可以求解目标的运动. 作者在文献[11]中给出了将成像共线方程与目标轨迹的时间多项式联立求解时间多项式各系数的基本算法. 下述的视线-轨迹交会算法虽然本质上是文献[11]中算法的另一种形式, 但并没有直接应用共线方程, 而是考虑更本质的观察视线与目标轨迹的交会关系.

2.3 视线-轨迹交会算法原理

设根据目标像点坐标和像机姿态确定 t_i ($i=1, 2, \dots, n$) 时刻的观察视线 l_i 的方向矢量为 $[l_{Xi}, l_{Yi}, l_{Zi}]^T$, 因而 l_i 的方程为

$$(X - X_{Ci})/l_{Xi} = (Y - Y_{Ci})/l_{Yi} = (Z - Z_{Ci})/l_{Zi}. \quad (1)$$

设目标运动轨迹由时间的多项式描述为

$$\left(\begin{matrix} X_{Pi} = \sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} t_i^{ka} & Y_{Pi} = \sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} t_i^{kb} & Z_{Pi} = \sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} t_i^{kc} \end{matrix} \right). \quad (2)$$

各时刻目标点的位置在对应的观察视线上, 即将(2)式代入(1)式得

$$\begin{aligned} \left(\sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} t_i^{ka} - X_{Ci} \right) / l_{Xi} &= \left(\sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} t_i^{kb} - Y_{Ci} \right) / l_{Yi} \\ &= \left(\sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} t_i^{kc} - Z_{Ci} \right) / l_{Zi}. \end{aligned} \quad (3)$$

这就是观察视线(1)式与目标轨迹(2)式进行交会的关系式, 将其化为两个关于目标运动轨迹时间多项式各系数 $a_{ka}(k_a=0, 1, \dots, n_x)$, $b_{kb}(k_b=0, 1, \dots, n_y)$, $c_{kc}(k_c=0, 1, \dots, n_z)$ 的线性方程:

$$\begin{cases} \sum_{ka=0}^{n_x} l_{Zi} t_i^{ka} a_{ka} - \sum_{kc=0}^{n_z} l_{Xi} t_i^{kc} c_{kc} = l_{Zi} X_{Ci} - l_{Xi} Z_{Ci}, \\ \sum_{kb=0}^{n_y} l_{Zi} t_i^{kb} b_{kb} - \sum_{kc=0}^{n_z} l_{Yi} t_i^{kc} c_{kc} = l_{Zi} Y_{Ci} - l_{Yi} Z_{Ci}. \end{cases} \quad (4)$$

将 n 个时刻的(4)式联立, 组成线性方程组, 作为本文单目运动轨迹交会法的基本方程. 当该方程组有确定解时, 就可以求解描述目标运动的时间多项式各系数, 也就确定了点目标的运动参数. 例如其中

a_1, b_1, c_1 和 a_2, b_2, c_2 分别为目标在 X, Y, Z 三个方向的速度分量和加速度分量. 将时刻 t_i 代入(2)式, 就得到目标在各时刻的空间位置.

3 可解条件讨论

3.1 目标运动参数有确定解的条件

将基本方程(4)写为矩阵形式:

$$M_{2n \times (n_x + n_y + n_z + 3)} S_{(n_x + n_y + n_z + 3) \times 1} = B_{2n \times 1}, \quad (5)$$

其中共有 $(n_x + n_y + n_z + 3)$ 个未知数的未知数向量

$$S = [a_0 \ \dots \ a_{n_x} \ b_0 \ \dots \ b_{n_y} \ c_0 \ \dots \ c_{n_z}]^T, \quad (6)$$

常数项向量

$$B = [l_{Z1} X_{C1} - l_{X1} Z_{C1} \ l_{Z1} Y_{C1} - l_{Y1} Z_{C1} \ \dots \ l_{Zi} X_{Ci} - l_{Xi} Z_{Ci} \ l_{Zi} Y_{Ci} - l_{Yi} Z_{Ci} \ \dots \ l_{Zn} X_{Cn} - l_{Xn} Z_{Cn} \ l_{Zn} Y_{Cn} - l_{Yn} Z_{Cn}]^T, \quad (7)$$

系数矩阵

$$M = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \dots & l_{Zi} t_i^{ka} & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & -l_{Xi} t_i^{kc} & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dots & l_{Zi} t_i^{kb} & \dots & \dots & -l_{Yi} t_i^{kc} & \dots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i \\ \parallel \\ 1, \\ 2, \\ \vdots \\ n \end{Bmatrix} \left\{ \begin{matrix} k_a = 0, 1, \dots, n_x; \\ k_b = 0, 1, \dots, n_y; \\ k_c = 0, 1, \dots, n_z \end{matrix} \right. \quad (8)$$

由于基本方程(5)是根据目标运动轨迹的描述得到的, 所以真实的目标运动参数一定符合基本方程, 是本问题的一组解, 即线性方程组(5)一定有解. 因而

$$R(M) = R(\bar{M}) \leq (n_x + n_y + n_z + 3), \quad (9)$$

其中 $R(M)$ 表示系数矩阵 M 的秩, \bar{M} 为线性方程组(5)的增广矩阵 $[M \ B]$. 线性方程组有解时, 只可能有唯一解或者有无穷多组解. 本问题中, 当基本方程有唯一解时, 能够求解得到真实的目标运动参数. 而如果基本方程有无穷多组解, 就需要另外增加约束条件才能确定目标运动参数. 使线性方程组式(5)有唯一解, 也就是使本问题有确定解的条件是: 系数矩阵 M 的秩 $R(M)$ 等于待求解的未知数个数 $(n_x + n_y + n_z + 3)$. 这自然要求观测次数 n 满足 $2n \geq (n_x + n_y + n_z + 3)$. 而如果不考虑目标运动规律, 则要确定目标在各个时刻的位置 (X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi}) , 有 $3n$ 个未知数, 未知数的数目总是大于方程的数目 $2n$, 这就是常规方法无法单目求解点目标运动参数的原因.

一般情况下, 像机连续采图的时间间隔 Δt 是相等的. 不妨将初始时刻设为 $t_1=0$, 则第 i 个时刻为 $t_i=(i-1)\cdot\Delta t$. 因而线性方程组(5)的系数矩阵成为

$$\mathbf{M}_{2n \times (nX+nY+nZ+3)} = \Delta t \cdot \mathbf{M}'_{2n \times (nX+nY+nZ+3)}, \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & l_{Z_i}(i-1)^{ka} & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & -l_{X_i}(i-1)^{kc} & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dots & l_{Z_i}(i-1)^{kb} & \dots & \dots & -l_{Y_i}(i-1)^{kc} & \dots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\{k_a = 0, 1, \dots, n_X; \quad k_b = 0, 1, \dots, n_Y; \quad k_c = 0, 1, \dots, n_Z\}$$

$$\{i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (11)$$

因而, 单目运动轨迹交会法能够得到点目标运动参数确定解的条件是: 各时刻观察视线的方向矢量 $[l_{X_i}, l_{Y_i}, l_{Z_i}]^T (i=1, 2, \dots, n)$ 构成的形如(11)式的矩阵 \mathbf{M}' 的秩 $R(\mathbf{M}')$ 等于问题中待求解参数的个数, 即

$$R(\mathbf{M}') = n_X + n_Y + n_Z + 3, \quad (12)$$

其中 n_X, n_Y, n_Z 为分别描述目标 X, Y, Z 位置分量的时间多项式的次数.

与常规点交会的情况类似, 在有确定解的条件下, 应通过合理规划像机的运动, 使得各时刻观察视线之间形成较好的交会角度, 有利于得到较高精度的结果, 并提高对各种噪声的适应性, 使计算稳定.

3.2 无法得到确定解的情况举例

上节给出了本文方法能够得到目标运动参数确定解的条件. 而实际中会存在无确定解的情况, 下面讨论两种这样的情况.

1) 如果像机运动也能用时间的多项式描述, 并且描述像机运动的时间多项式的次数等于或低于描述目标运动的时间多项式的次数, 则无法确定目标的运动参数.

设像机的运动可用时间的多项式描述为

$$\left\{ X_{C_i} = \sum_{ha=0}^{n_{CX}} a_{Cha} t_i^{ha}, Y_{C_i} = \sum_{hb=0}^{n_{CY}} b_{Chb} t_i^{hb}, Z_{C_i} = \sum_{hc=0}^{n_{CZ}} c_{Chc} t_i^{hc} \right\}. \quad (13)$$

描述目标运动的时间多项式为(2)式. 其中 $n_{CX} \leq n_X, n_{CY} \leq n_Y, n_{CZ} \leq n_Z$. 设 t_i 时刻观察视线的方向矢量为 $[l_{X_i}, l_{Y_i}, l_{Z_i}]^T, i=1, \dots, n$. 像机光心 C_i 和目标 P_i 都在该视

线上, 因而:

$$\begin{cases} X_{P_i} = \sum_{ka=0}^{n_X} a_{ka} t_i^{ka} = X_{C_i} + \lambda_i l_{X_i} = \sum_{ha=0}^{n_{CX}} a_{Cha} t_i^{ha} + \lambda_i l_{X_i}, \\ Y_{P_i} = \sum_{kb=0}^{n_Y} b_{kb} t_i^{kb} = Y_{C_i} + \lambda_i l_{Y_i} = \sum_{hb=0}^{n_{CY}} b_{Chb} t_i^{hb} + \lambda_i l_{Y_i}, \\ Z_{P_i} = \sum_{kc=0}^{n_Z} c_{kc} t_i^{kc} = Z_{C_i} + \lambda_i l_{Z_i} = \sum_{hc=0}^{n_{CZ}} c_{Chc} t_i^{hc} + \lambda_i l_{Z_i}. \end{cases} \quad (14)$$

消去 λ_i 并整理得到

$$\begin{cases} \sum_{ka=0}^{n_X} a_{ka} t_i^{ka} - \frac{l_{X_i}}{l_{Z_i}} \sum_{kc=0}^{n_Z} c_{kc} t_i^{kc} = \sum_{ha=0}^{n_{CX}} a_{Cha} t_i^{ha} - \frac{l_{X_i}}{l_{Z_i}} \sum_{hc=0}^{n_{CZ}} c_{Chc} t_i^{hc}, \\ \sum_{kb=0}^{n_Y} b_{kb} t_i^{kb} - \frac{l_{Y_i}}{l_{Z_i}} \sum_{kc=0}^{n_Z} c_{kc} t_i^{kc} = \sum_{hb=0}^{n_{CY}} b_{Chb} t_i^{hb} - \frac{l_{Y_i}}{l_{Z_i}} \sum_{hc=0}^{n_{CZ}} c_{Chc} t_i^{hc}, \end{cases} \quad (15)$$

这是关于 $a_{ka}(k_a=0, 1, \dots, n_X), b_{kb}(k_b=0, 1, \dots, n_Y), c_{kc}(k_c=0, 1, \dots, n_Z)$ 的线性方程组, 也就是像机运动用时间多项式描述时本问题的基本方程. 可见, 由于 $n_{CX} \leq n_X, n_{CY} \leq n_Y, n_{CZ} \leq n_Z$, 除了真实目标轨迹, 使方程等号两侧对应的时间各次项的系数相等的下式也是基本方程的解:

$$\begin{cases} \text{if } k_a \leq n_{CX}, a_{ka} = a_{Cka}; & \text{if } k_a > n_{CX}, a_{ka} = 0; \\ \text{if } k_b \leq n_{CY}, b_{kb} = b_{Ckb}; & \text{if } k_b > n_{CY}, b_{kb} = 0; \\ \text{if } k_c \leq n_{CZ}, c_{kc} = c_{Ckc}; & \text{if } k_c > n_{CZ}, c_{kc} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

即除了真实的目标运动轨迹, 由于像机轨迹是次数更低的时间多项式, 自然也满足对目标轨迹的时间多项式约束, 因而也是基本方程的一组解. 而根据前述讨论, 基本方程的解只有两种情况: 有唯一确定解或有无穷多组解. 因而, 当描述像机运动的时间多项式次数等于或低于描述目标运动的时间多项式次数时, 基本方程有无穷多组解, 无法确定目标运动参数.

2) 如果所有观察视线相交于同一点, 则无法确定目标的运动参数.

设各时刻的观察视线 l_i 都通过点 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$. 由于 P_0 和目标 P_i 都在直线 l_i 上, 因而:

$$\begin{cases} X_{P_i} = \sum_{ka=0}^{n_X} a_{ka} t_i^{ka} = X_0 + \lambda_i l_{X_i}, \\ Y_{P_i} = \sum_{kb=0}^{n_Y} b_{kb} t_i^{kb} = Y_0 + \lambda_i l_{Y_i}, \\ Z_{P_i} = \sum_{kc=0}^{n_Z} c_{kc} t_i^{kc} = Z_0 + \lambda_i l_{Z_i}. \end{cases} \quad (17)$$

对于任意非零常数 d , 可得到另一组在每一时刻

落在对应观察视线上的空间位置坐标:

$$\left(X'_{P_i} = X_0 + d\lambda_i l_{X_i}, Y'_{P_i} = Y_0 + d\lambda_i l_{Y_i}, Z'_{P_i} = Z_0 + d\lambda_i l_{Z_i} \right). \quad (18)$$

从(17)式可以得到

$$\left(\begin{aligned} \lambda_i l_{X_i} &= \sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} t_i^{ka} - X_0, \quad \lambda_i l_{Y_i} = \sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} t_i^{kb} - Y_0, \\ \lambda_i l_{Z_i} &= \sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} t_i^{kc} - Z_0. \end{aligned} \right). \quad (19)$$

将其代入(18)式, 得到

$$\left\{ \begin{aligned} X'_{P_i} &= X_0 + d \left(\sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} t_i^{ka} - X_0 \right) = \sum_{ka=0}^{n_x} da_{ka} t_i^{ka} + (1-d) X_0, \\ Y'_{P_i} &= Y_0 + d \left(\sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} t_i^{kb} - Y_0 \right) = \sum_{kb=0}^{n_y} db_{kb} t_i^{kb} + (1-d) Y_0, \\ Z'_{P_i} &= Z_0 + d \left(\sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} t_i^{kc} - Z_0 \right) = \sum_{kc=0}^{n_z} dc_{kc} t_i^{kc} + (1-d) Z_0. \end{aligned} \right. \quad (20)$$

可见, 这也满足目标轨迹 X, Y, Z 分量分别为时间 t 的 n_x, n_y, n_z 次多项式的约束. 即 $(X'_{P_i}, Y'_{P_i}, Z'_{P_i})$ 既在观察视线上, 满足成像关系, 同时又满足目标运动规律约束, 因而也是基本方程的解. 由于非零常数 d 是任取的, 因而基本方程有无穷多组解, 在没有更多约束条件时, 无法确定目标的真实运动轨迹. 这可以由图 3 直观地解释, 当所有观察视线 l_i 交于同一点 P_0 时, 只要 l_i 上的点 P'_i 与目标的真实位置 P_i 分别到 P_0 的距离之比在各条定向线上—致, 即 $|P'_i P_0|/|P_i P_0| = \text{常数}$, 则 P'_i 所描出的轨迹与真实轨迹形状相似, 都满足同一形式的时间多项式, 因而无法确定真实轨迹.

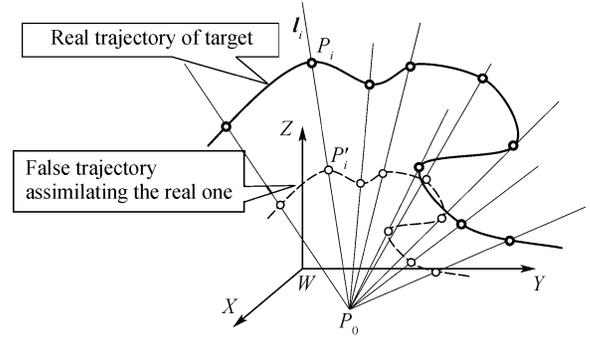


图 3 观察视线交于同一点无法确定目标轨迹

由于一组平行直线相交于无穷远点, 因而当所有观察视线相互平行时, 是上述所有观察视线相交于同一点的特例, 同样无法确定目标的运动参数.

实际上, 对于上述两种情况以及更多的无法得到确定解的情况, 都可以直观的理解为: 除了真实目标轨迹, 如果还能够找到在各个时刻的位置分别落在对应观察视线上的运动轨迹, 并且该条轨迹可以用时间的多项式来描述, 其次数等于或低于描述真实目标运动的时间多项式的次数, 则意味着能够找到无数条既满足成像关系, 又满足目标运动规律约束的运动轨迹, 因而无法确定真实的目标运动. 为了使算法在实际应用中对各种噪声不敏感, 应合理规划像机的运动, 避开各种使问题奇异的情况, 并构造良好的交会条件.

4 虚拟视线交会算法

下面给出一种空间关系上更直观的单目运动轨迹交会的算法——虚拟视线交会算法.

想象将坐标系建立在点目标上, 并且将此目标

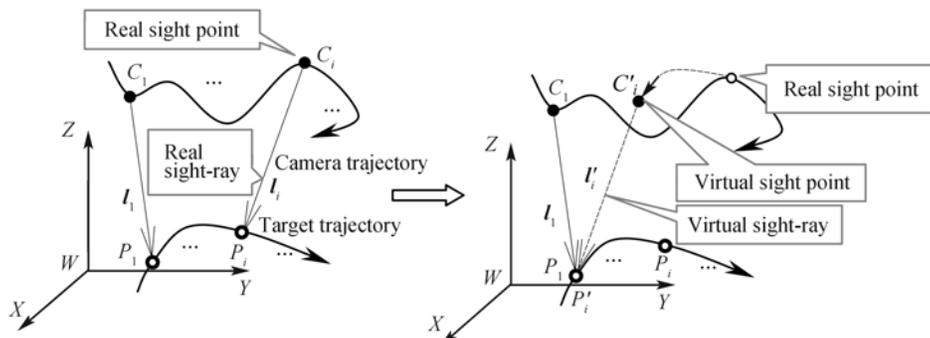


图 4 虚拟视线交会算法原理示意图

坐标系的时间轴压缩到某一时刻, 在点目标上观察像机在此坐标系中不同时刻的位置. 当各时刻观察视线不平行时, 则相当于像机从不同的方位观察目标. 如图4, 将第 t_i 时刻目标的空间位置 $P_i(X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})$ 移至初始时刻的位置 $P_1(X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1})$, 为了保持目标与像机间的相对关系不变, 将像机光心位置从实际视点 $C_i(X_{C_i}, Y_{C_i}, Z_{C_i})$ 沿与移动目标位置同样的轨迹移至虚拟视点 $C'_i(X'_{C_i}, Y'_{C_i}, Z'_{C_i})$, 则观察视线也由实际视线 l_i 移至虚拟视线 l'_i . 可见, 光心由实际视点 C_i 移至虚拟视点 C'_i 的平移量与目标位置从 P_i 移至 P_1 的平移量相同.

设观察视线 l_i 的方向矢量为 $[l_{X_i}, l_{Y_i}, l_{Z_i}]^T$, 则平移得到的虚拟视线 l'_i 的方向矢量也为 $[l_{X_i}, l_{Y_i}, l_{Z_i}]^T$. P_1 与虚拟视点 C'_i 同在 l'_i 上, 因而

$$\begin{aligned} (X_{P_1} - X'_{C_i})/l_{X_i} &= (Y_{P_1} - Y'_{C_i})/l_{Y_i} \\ &= (Z_{P_1} - Z'_{C_i})/l_{Z_i}. \end{aligned} \quad (21)$$

目标运动规律仍由时间的多项式(2)来描述, 则 C_i 移至 C'_i , P_i 移至 P_1 的平移量为

$$\begin{cases} \Delta X_i = X_{C_i} - X'_{C_i} = X_{P_i} - X_{P_1} \\ = \sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} t_i^{ka} - \sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} t_1^{ka} = \sum_{ka=0}^{n_x} a_{ka} (t_i^{ka} - t_1^{ka}), \\ \Delta Y_i = Y_{C_i} - Y'_{C_i} = Y_{P_i} - Y_{P_1} \\ = \sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} t_i^{kb} - \sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} t_1^{kb} = \sum_{kb=0}^{n_y} b_{kb} (t_i^{kb} - t_1^{kb}), \\ \Delta Z_i = Z_{C_i} - Z'_{C_i} = Z_{P_i} - Z_{P_1} \\ = \sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} t_i^{kc} - \sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} t_1^{kc} = \sum_{kc=0}^{n_z} c_{kc} (t_i^{kc} - t_1^{kc}). \end{cases} \quad (22)$$

由于 $t_i^0 = t_1^0 = 1$, 因而(22)式中 $a_0(t_i^0 - t_1^0) = b_0(t_i^0 - t_1^0) = c_0(t_i^0 - t_1^0) = 0$. 则从(21)式得到虚拟视点空间坐标为

$$\begin{cases} X'_{C_i} = X_{C_i} - \sum_{ka=1}^{n_x} a_{ka} (t_i^{ka} - t_1^{ka}), \\ Y'_{C_i} = Y_{C_i} - \sum_{kb=1}^{n_y} b_{kb} (t_i^{kb} - t_1^{kb}), \\ Z'_{C_i} = Z_{C_i} - \sum_{kc=1}^{n_z} c_{kc} (t_i^{kc} - t_1^{kc}). \end{cases} \quad (23)$$

将(23)式代入(21)式, 得到

$$\begin{aligned} & \frac{X_{P_1} - X_{C_i} + \sum_{ka=1}^{n_x} a_{ka} (t_i^{ka} - t_1^{ka})}{l_{X_i}} \\ &= \frac{Y_{P_1} - Y_{C_i} + \sum_{kb=1}^{n_y} b_{kb} (t_i^{kb} - t_1^{kb})}{l_{Y_i}} \\ &= \frac{Z_{P_1} - Z_{C_i} + \sum_{kc=1}^{n_z} c_{kc} (t_i^{kc} - t_1^{kc})}{l_{Z_i}}, \end{aligned} \quad (24)$$

这可以化为两个关于点目标的初始位置坐标 $(X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1})$ 和描述目标运动的时间多项式非零次项系数 $a_{ka}(k_a=1, \dots, n_x)$, $b_{kb}(k_b=1, \dots, n_y)$, $c_{kc}(k_c=1, \dots, n_z)$ 的线性方程:

$$\begin{cases} l_{Z_i} X_{P_1} - l_{X_i} Z_{P_1} + l_{Z_i} \sum_{ka=1}^{n_x} (t_i^{ka} - t_1^{ka}) a_{ka} \\ - l_{X_i} \sum_{kc=1}^{n_z} (t_i^{kc} - t_1^{kc}) c_{kc} = l_{Z_i} X_{C_i} - l_{X_i} Z_{C_i}, \\ l_{Z_i} Y_{P_1} - l_{Y_i} Z_{P_1} + l_{Z_i} \sum_{kb=1}^{n_y} (t_i^{kb} - t_1^{kb}) b_{kb} \\ - l_{Y_i} \sum_{kc=1}^{n_z} (t_i^{kc} - t_1^{kc}) c_{kc} = l_{Z_i} Y_{C_i} - l_{Y_i} Z_{C_i}. \end{cases} \quad (25)$$

这实际上是单目运动轨迹交会法基本方程式(4)的另一种形式, 相当于将 a_0, b_0, c_0 用 $(X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1})$ 的表达式进行了代换(下述的(27)式), 对它有确定解条件的讨论也与前述一致. 将 n 个时刻的(25)式联立, 组成基本方程. 当基本方程有确定解时, 就可以求解目标的初始位置和描述目标运动的时间多项式非零次项系数. 而根据目标运动形式(2)式, 有

$$\begin{cases} X_{P_1} = a_0 + \sum_{ka=1}^{n_x} a_{ka} t_1^{ka}, \\ Y_{P_1} = b_0 + \sum_{kb=1}^{n_y} b_{kb} t_1^{kb}, \\ Z_{P_1} = c_0 + \sum_{kc=1}^{n_z} c_{kc} t_1^{kc}. \end{cases} \quad (26)$$

从而描述目标运动的时间多项式零次项系数为

$$a_0 = X_{P_1} - \sum_{ka=1}^{n_x} a_{ka} t_1^{ka}; \quad b_0 = Y_{P_1} - \sum_{kb=1}^{n_y} b_{kb} t_1^{kb};$$

$$c_0 = Z_{P1} - \sum_{kc=1}^{n_z} c_{kc} t_1^{kc} \quad (27)$$

这就得到了目标运动参数, 进而可计算目标在各时刻的空间位置. 如果将初始时刻取为 0, 则上述各式的形式可以得到简化, 并且描述目标运动的时间多项式的零次项(a_0, b_0, c_0)正是目标的初始位置(X_{P1}, Y_{P1}, Z_{P1}).

对于像机和目标都在同一平面内运动的二维问题, 上述视线-轨迹交会和虚拟视线交会算法都得以简化表达, 本文不再赘述.

5 验证实验

5.1 数字仿真实验

下面的数字仿真实验分别针对三类情况: 在飞行平台上观测飞行目标; 在飞行平台上观测地面运动目标; 在地面运动平台上观测地面运动目标.

以下数字仿真中, 取观测历时 10 秒, 相邻两次成像时间间隔 $\Delta t=0.1$ 秒, 成像 100 次进行解算. 取初始时刻 $t_1=0$, 则第 $i(i=1,2, \dots, 100)$ 时刻为 $t_i=(i-1)\Delta t$ 秒. 仿真计算时, 给像机光心位置加入均方差 0.1 m 的随机误差; 设图像规格为 1024×1024 pixel, 水平和垂直方向视场角都为 30° , 给目标像点提取结果加入均方差 0.5 pixel 的随机误差, 即给观察视线方向角加入均方差($30^\circ \times 0.5 / 1024 = 0.015^\circ$)的随机误差.

1) 飞行平台观测飞行目标, 像机与目标都作空间三维运动的数字仿真.

仿真目标运动轨迹取为(单位: m)

$$\begin{cases} X_P = 100 - 10 \cdot t + t^2 - 0.5 \cdot t^3, \\ Y_P = -50 + 5 \cdot t - 0.5 \cdot t^2, \\ Z_P = 10 + 5 \cdot t - 2 \cdot t^2 + 0.5 \cdot t^3. \end{cases} \quad (28)$$

将像机和目标的轨迹描绘在空间坐标系中如图 5.

观测过程中, 目标运动距离约 500 m, 像机运动距离约 1000 m, 像机与目标之间相距约 600~800 m. 给光心位置和观察视线方向角加入随机误差, 计算目标运动参数和各时刻目标空间位置. X, Y 和 Z 方向目标位置分量计算结果均方误差分别为 0.34, 0.50 和 0.45 m.

2) 飞行平台观测地面运动目标, 像机和目标分别为两个平面内的二维运动.

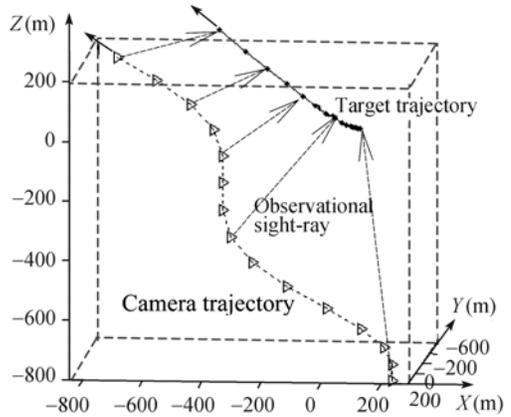


图 5 飞行平台观测飞行目标数字仿真像机和目标的轨迹 (各只描出 15 个位置和 4 条观察视线)

仿真目标运动轨迹取为(单位: m)

$$\begin{cases} X_P = -50 + 80 \cdot t - 0.5 \cdot t^2, \\ Y_P = -20 + 10 \cdot t - t^2 + 0.1 \cdot t^3, \\ Z_P = 0. \end{cases} \quad (29)$$

将像机和目标的轨迹描绘在空间坐标系中如图 6.

观测过程中, 目标运动距离约 800 m, 像机运动距离约 900 m, 像机与目标之间相距约 800 m. 给光心位置和观察视线方向角加入随机误差, 计算目标运动参数和各时刻目标空间位置. X, Y 和 Z 方向目标位置分量计算结果均方误差分别为 0.10, 0.64 和 0.68 m.

3) 地面平台观测地面运动目标, 像机和目标为在同一平面内的二维运动.

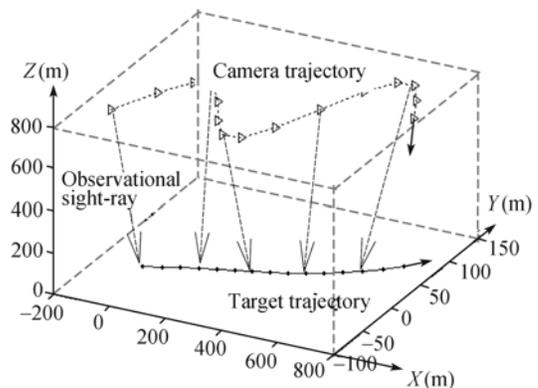


图 6 飞行平台观测地面运动目标数字仿真像机和目标的轨迹

(各只描出 15 个位置和 5 条观察视线)

像机和目标都在 W - XY 平面内做二维运动, 仿真目标运动轨迹取为(单位: m)

$$\begin{cases} X_p = -20 + 10 \cdot t - 5 \cdot t^2, \\ Y_p = -50 + 80 \cdot t + 0.5 \cdot t^2. \end{cases} \quad (30)$$

将像机和目标的轨迹描绘在 W - XY 平面中如图 7.

观测过程中, 目标运动距离约 800 m, 像机运动距离约 2000 m, 像机与目标之间相距约 400~1000 m. 给光心位置和观察视线方向角加入随机误差, 计算目标运动参数和各时刻目标空间位置. X 和 Y 方向目标位置分量计算结果均方误差分别为 0.27 和 0.22 m.

5.2 实物验证实验

实物验证实验装置如图 8, 像机和目标各安装在一部转台上. 两部转台分别控制像机和目标的运动, 同时像机采集目标的序列图像. 像机内参数和像差

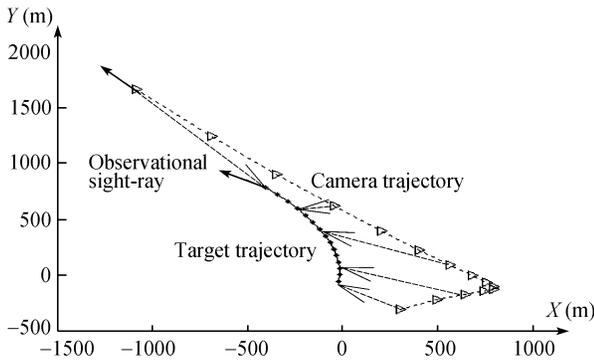


图 7 地面平台观测地面运动目标数字仿真像机和目标的轨迹
(各只描出 15 个位置和 5 条观察视线)

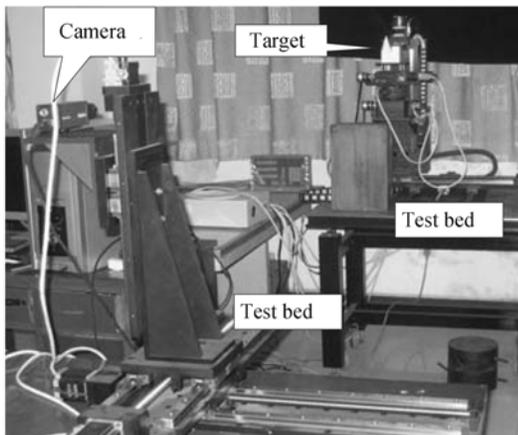


图 8 单目运动轨迹交会法实物验证实验场景

系数已标定, 各采图时刻像机外参数以及目标运动参数由转台的运动控制机构给出. 采用单目运动轨迹交会法解算各时刻目标三维运动轨迹和速度. 实验中, 目标运动最大行程约为 400 mm, 像机和目标相距约 2 m. 将目标运动参数测量结果与真值进行对比, 并对多次实验结果进行统计. 目标位置测量结果误差均方差为 3.7 mm, 目标运动速度测量结果误差均方差为 0.70 mm/s.

6 结论

本文提出并实现了一种机动平台单目对点目标运动参数进行测量的新概念理论和方法: 单目运动轨迹交会法; 以及两种求解算法: 视线-轨迹交会算法和虚拟视线交会算法. 并对该方法的原理、解算方法和求解条件进行了全面的研究.

本文方法基于自然连续运动的目标, 其运动轨迹在短时间内可由时间的有限次多项式来描述, 并且当目标不是做机动性特别强的运动时, 短时间内用时间的 3~4 次多项式来描述目标的运动规律是合理的. 本文方法以此目标的运动参数方程作为辅助约束, 与基本成像关系联合求解, 实现单目对点目标运动的测量. 这一轨迹交会的概念与传统的视线点交会的不同在于, 视线点交会的各条视线相交于同一空间点位置, 而轨迹交会的各条视线不必相交, 而是分别与目标的运动轨迹相交于各时刻目标所在的不同空间位置. 另外, 视线点交会计算求解的仅是静止目标的空间位置, 而轨迹交会计算则同时得到了目标的位置、速度、加速度等运动参数.

特别是, 本文通过对单目运动轨迹交会法有确定解条件的研究, 提出了应用本方法对摄像机运动的要求. 为了进行有效求解, 必须根据目标情况和实际条件对摄像机的运动进行合理的规划, 避开各种使求解奇异或不稳定的情况. 从而使单目运动轨迹交会法成为了一种较完备、实用的理论和测量手段.

本文通过数字仿真实验和实物实验对所提出的方法进行了验证. 数字仿真实验模拟了对应三类实际问题的情况: 摄像机和目标都为空间三维运动, 摄像机和目标分别为两个平面内的二维运动, 摄像机和目标为在同一平面内的二维运动. 验证实验表明,

通过合理规划摄像机运动轨迹, 本文方法能够得到较高精度的目标运动测量结果.

本文方法突破了仅由运动平台单目无法测量点目标三维运动的限制, 并且不需要增加辅助设备或改造成像光路, 解决了单目被动测量点目标三维运

动这类视觉测量难题, 拓展了视觉测量的领域. 该方法可用于机器人、车、船、航空器、航天器等机动平台单目被动测量地面或空间点目标三维运动, 解决长航时飞行目标测控、地面或空间非合作目标远距离监测等难题.

参考文献

- 1 王之卓. 摄影测量学. 北京: 测绘出版社, 1982
- 2 马颂德, 张正友. 计算机视觉. 北京: 科学出版社, 1998
- 3 Arras K O, Tomatis N. Improving robustness and precision in mobile robot localization by using laser range finding and monocular vision. 1999 Third European Workshop on Advanced Mobile Robots (Eurobot '99). Zurich, 1999. 177—185
- 4 Arras K O, Tomatis N, Siegwart R. Multisensor on-the-fly localization using laser and vision. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). Takamatsu, 2000, 1: 462—467
- 5 Arras K O, Tomatis N. Multisensor on-the-fly localization: precision and reliability for applications. 2001 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing. Budapest, 2001, 34(2-3): 131—143
- 6 Zhuang Y, Xu X D, Pan X J, et al. Mobile robot indoor navigation using laser range finder and monocular vision Robotics. 2003 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing. Changsha, 2003, 1: 77—82
- 7 庄严, 王伟, 王柯, 等. 移动机器人基于激光测距和单目视觉的室内同时定位和地图构建. 自动化学报, 2005, 31(6): 925—933
- 8 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. 光学学报, 2005, 25(7): 943—948
- 9 郑元杰, 杨杰. 基于单摄像头双目成像系统在计算机视觉中的应用研究. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 392—396
- 10 张广军. 视觉测量. 北京: 科学出版社, 2008
- 11 张小虎, 邱慧, 周剑, 等. 一种单像机对运动目标定位的新方法. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 114—118