

一种利用 PCA 的导弹轨迹重建方法

左峥嵘, 吴 婷

(华中科技大学自动化学院多谱信息处理国防重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 非同时刻成像将大幅恶化立体视觉方法对导弹的轨迹点重建精度和射向估计精度, 针对这一问题, 该文提出了应用主成分分析(PCA)重建导弹轨迹并且估计导弹射向的方法。论文在同步轨道双星观测条件下推导了将 PCA 方法应用到导弹轨迹重建及射向估计的原理, 论证了目标三维轨迹最小方差投影直线在像面上的投影即为目标成像轨迹的最小方差投影直线, 给出了通过求取目标成像轨迹的最小方差投影直线重建导弹发射面和轨迹点的算法。仿真实验表明了该方法可以有效地进行弹道轨迹的三维重建及射向估计, 与现有方法相比, PCA 方法重建精度更高, 相机定标误差在一定范围内时, 射向估计误差更小。

关键词: 三维重建; 射向估计; 主成分分析; 导弹轨迹

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2013)11-1468-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.11.008

A Missile Trajectory Reconstruction Method Based on PCA

ZUO Zheng-rong, WU Ting

(State Key Laboratory for Multi-Spectral Information Processing Technology, School of Automation,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Asynchronous imaging of dual cameras usually deteriorates the estimation of ballistic trajectory. To improve the performance of the estimation, a method for reconstructing missile trajectory and estimating missile course based on principal component analysis (PCA) is proposed. Firstly, the principle of missile trajectory reconstruction and course estimation based on PCA is derived under the background of binary observation on geosynchronous orbit. It is proved that the PCA transformed image trajectory of target is exactly the projection of the PCA transformed 3D trajectory. Then, the algorithm for estimating the missile course and trajectory through the PCA transformed image trajectory is proposed, and the reconstruction experiments are used to verify the proposed PCA method's feasibility and availability for 3D reconstruction and course estimation of missile trajectory. Compared with the traditional stereo-vision based method, the PCA method has higher trajectory reconstruction accuracy and smaller course estimation error within a certain range of camera calibration error.

Key words: 3D reconstruction; Missile course evaluation; Principal component analysis; Missile trajectory

0 引 言

现有的目标重建采用立体视觉的方法^[1], 结合空间点的成像映射方程, 利用最小二乘重建空间点^[2-3], 该方法适用于同名点的重建。但对于运动目标, 非同时刻成像的目标点并非同名点, 需要通过插值估计得到图像上的同名点位置, 而同名点位

置估计误差将会增大目标位置的重建误差。文献[4]以最小二乘为基础, 引入离散的标准正交多项式拟合主动段弹道, 用于弹道重建, 但是需要根据弹道特性进行适当分段, 导致了拟合弹道轨迹间断点的增加。文献[5]考虑了传感器布局对目标重建的影响, 提出了利用加权最小二乘重建的方法, 但这种方法需要正确地估计目标到相机的距离。本文提出

了一种利用主成分分析 (principal component analysis, PCA)^[6-8] 进行导弹轨迹重建的方法,该方法通过对像面上导弹轨迹点进行主成分分析,对主成分进行重建,确定弹道面方程,最后将导弹成像点映射到弹道面上,从而实现导弹轨迹重建。与已有方法相比,该方法不需要进行同名点的插值,也不需要估计目标到相机的距离,降低了计算复杂度,提高了重建精度。

1 利用 PCA 进行导弹轨迹重建原理

PCA 方法能够寻找在最小均方意义下代表原始数据的投影方法,达到对特征空间降维的目的,将高维数据投影到低维空间,在低维空间寻找互不相关的正交新变量,使它们反映事物的主要特征,体现原有变量的综合效果。

假设地心坐标系到静止轨道上^[9-10] 传感器坐标系的转换矩阵^[1] 为 M , M 为 3×3 单位正交矩阵,在地心坐标系下,相机光心的位置为 $Q(q_x, q_y, q_z)$,目标的真实轨迹为 P_1, P_2, \dots, P_n ,其中点 P_i 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $1 \leq i \leq n$, n 为导弹在像上轨迹点的个数。则相机光心 Q 到目标点位置 P_i 的向量为 $\overrightarrow{QP_i} = (x_i - q_x, y_i - q_y, z_i - q_z)$, $\overrightarrow{QP_i}$ 在传感器坐标系下的表示为 (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})

$$\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i - q_x \\ y_i - q_y \\ z_i - q_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于目标整个轨迹,有 n 个式(2) 所述方程,将这 n 个方程相加后可以得到

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{ci} \\ \sum_{i=1}^n y_{ci} \\ \sum_{i=1}^n z_{ci} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i - nq_x \\ \sum_{i=1}^n y_i - nq_y \\ \sum_{i=1}^n z_i - nq_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

目标轨迹均值点坐标为

$$\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i, y_i, z_i) \quad (3)$$

则式(2) 可以表示为

$$\frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{ci} \\ \sum_{i=1}^n y_{ci} \\ \sum_{i=1}^n z_{ci} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} m_x - q_x \\ m_y - q_y \\ m_z - q_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(1) 减去式(4) 得到

$$C_i = M \begin{bmatrix} x_i - m_x \\ y_i - m_y \\ z_i - m_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$C_i = \left[x_{ci} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ci} \quad y_{ci} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ci} \quad z_{ci} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ci} \right]^T$$

由式(5) 可得

$$C_i C_i^T = M \begin{bmatrix} x_i - m_x \\ y_i - m_y \\ z_{ki} - m_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - m_x \\ y_i - m_y \\ z_{ki} - m_z \end{bmatrix}^T M^T \quad (6)$$

对于目标在像面上的每个轨迹点都可以得到一个(6) 式所述方程,将这些方程相加后可以得到

$$\sum_{i=1}^n C_i C_i^T = M S M^T \quad (7)$$

其中 S 为目标轨迹点的散布矩阵,

$$S = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} x_i - m_x \\ y_i - m_y \\ z_i - m_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - m_x \\ y_i - m_y \\ z_i - m_z \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

由式(7) 可得

$$S = M^{-1} \sum_{i=1}^n C_i C_i^T M \quad (9)$$

设 e 表示散布矩阵 S 的本征值 λ 对应的本征向量,即 $S e = \lambda e$,将式(9) 等式两边同时乘以向量 e 得到

$$S e = M^{-1} \sum_{i=1}^n C_i C_i^T M e \quad (10)$$

由于 $S e = \lambda e$, 则(10) 式可以变为

$$\lambda M e = \sum_{i=1}^n C_i C_i^T M e \quad (11)$$

设 e' 为 e 在传感器坐标系下的投影,即 e' 满足 $e' = M e$, 则(11) 式等价于

$$\lambda e' = \sum_{i=1}^n C_i C_i^T e' \quad (12)$$

从式(12) 可以看出, e' 为传感器坐标系下目标成像

点序列协方差矩阵 $\sum_{i=1}^n C_i C_i^T$ 的特征值 λ 对应的特征向量, 向量 e 和 e' 对应着相同的特征值 λ 。

设 e_0 和 e'_0 分别为矩阵 S 和 $\sum_{i=1}^n C_i C_i^T$ 的最大特征值 λ_0 对应的本征向量, 满足 $e'_0 = M e_0$, 通过导弹三维轨迹的均值点 m 并且斜率与向量 e_0 相同的直线即为导弹轨迹最小方差投影直线^[6], 直线方程可以表示为:

$$X = m + a e_0 \quad (13)$$

其中 $X = (x, y, z)$, a 为一个标量, 表示直线上某个点离开均值点 m 的距离。

设导弹轨迹成像点的像面坐标为 (u_i, v_i) , 像面中心的坐标为 (u_0, v_0) , 相机光心到像面的距离为 f , 由于提取主成分的目的是对数据降维, 而传感器坐标系下目标成像点序列 $(u_i - u_0, v_i - v_0, -f)$ 的第三维值为 $-f$ 为一定值, 对于主成分提取不提供有用信息, 所以最小方差投影方向向量 e'_0 的第三维分量为零。在传感器坐标系下, 目标成像轨迹的均值点为 $m' = (\bar{u} - u_0, \bar{v} - v_0, -f)$, 其中 $\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$,

$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$ 。通过点 m' 并且斜率与向量 e'_0 相同的直线即为导弹像面轨迹最小方差投影直线, 其方程为

$$X' = m' + a e'_0 \quad (14)$$

设 $e' = (e'_1, e'_2, 0)^T, X' = (u - u_0, v - v_0, -f)^T$, 式(14)可以表示为

$$e'_2 u - e'_1 v + e'_1 \bar{v} - e'_2 \bar{u} = 0 \quad (15)$$

又由于投影关系 $e'_0 = M e_0, m' = M m$, 可以得到 $X' = M X$, 即目标三维轨迹最小方差投影直线在像面上的投影为目标成像轨迹的最小方差投影直线。

如图 1 所示, 设两传感器光心在地心坐标系下的位置分别为 Q_1 和 Q_2 , 对两像面上导弹轨迹点序列进行 PCA 分析得到的最小方差投影直线分别为 l_1

$$S_k = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_k} (u_{ki} - \bar{u}_k)(u_{ki} - \bar{u}_k) & \sum_{i=1}^{n_k} (u_{ki} - \bar{u}_k)(v_{ki} - \bar{v}_k) \\ \sum_{i=1}^{n_k} (u_{ki} - \bar{u}_k)(v_{ki} - \bar{v}_k) & \sum_{i=1}^{n_k} (v_{ki} - \bar{v}_k)(v_{ki} - \bar{v}_k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, u_{ki}, v_{ki} 分别为导弹成像点在传感器像面 k 上的行列坐标, $1 \leq i \leq n_k, n_k$ 为导弹在像面 k 上轨迹点

和 l_2 , 由直线 l_1 和点 Q_1 构成的面 A 与由直线 l_2 和点 Q_2 构成的面 B 的交线 l 即为导弹三维轨迹最小方差投影直线。由于直线 l 在弹道面内, 主动段弹道近似在一个经过地心 O 的平面内^[11], 所以点 O 和直线 l 确定的平面 D 即为真实弹道面的估计。将像面上导弹每个成像轨迹点到相机光心的直线在地心坐标系下的表示出来, 计算该直线与估计弹道面 D 的交点, 即为导弹轨迹点的重建点。

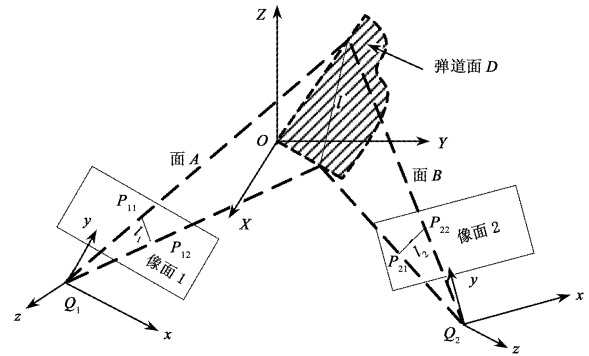


图 1 特征向量的重建

Fig. 1 Reconstruction for eigenvector

2 重建算法

如图 2 所示, 利用 PCA 进行导弹轨迹重建包括以下四个步骤: 导弹像面轨迹主成分分析、导弹三维轨迹主成分重建、弹道面估计和导弹轨迹点重建。

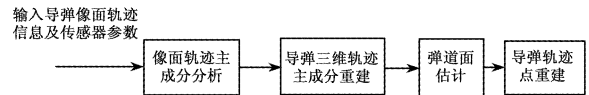


图 2 利用 PCA 进行导弹轨迹重建的流程

Fig. 2 Process of missile trajectory reconstruction using PCA

步骤 1. 对导弹像面轨迹进行主成分分析:

分别计算传感器像面 k 上导弹轨迹序列的散布矩阵 S_k , 其中 $k = 1, 2$

的个数, \bar{u}_k, \bar{v}_k 分别为导弹在像面上成像轨迹点的行列坐标均值

$$\bar{u}_k = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n u_{ki} \right), \bar{v}_k = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n v_{ki} \right) \quad (17)$$

求得 S_k 对应的最大特征值 λ_k 和 λ_k 对应的特征向量 $w_k = (w_{k1}, w_{k2})$ 。直线 l_1, l_2 方程分别为:

$$l_1: w_{12}u - w_{11}v + w_{11}\bar{v}_1 - w_{12}\bar{u}_1 = 0 \quad (18)$$

$$l_2: w_{22}u - w_{21}v + w_{21}\bar{v}_2 - w_{22}\bar{u}_2 = 0$$

步骤 2. 导弹三维轨迹主成分重建步骤:

在直线 l_1 和 l_2 上分别任取两个点, 例如 $P_{k1}(\bar{u}_k, \bar{v}_k), P_{k2}(\bar{u}_k + w_{k2}, \bar{v}_k + w_{k1})$, 相应传感器光心 Q_k 到这两点的向量在传感器坐标系下分别表示为: $\overrightarrow{Q_k P_{k1}} = (x_{k1}, y_{k1}, z_{k1})$ 和 $\overrightarrow{Q_k P_{k2}} = (x_{k2}, y_{k2}, z_{k2})$, 其中

$$\begin{cases} z_{k1} = -f \\ x_{k1} = z_{k1} \cdot \tan((\bar{u}_k - u_0) \cdot \varphi_y) \\ y_{k1} = z_{k1} \cdot \tan((\bar{v}_k - v_0) \cdot \varphi_x) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} z_{k2} = -f \\ x_{k2} = z_{k2} \cdot \tan((\bar{u}_k + w_{k2} - u_0) \cdot \varphi_y) \\ y_{k2} = z_{k2} \cdot \tan((\bar{v}_k + w_{k1} - v_0) \cdot \varphi_x) \end{cases} \quad (20)$$

式中, u_0, v_0 分别为像面中心行坐标和列坐标; φ_y 和 φ_x 分别为像面行和列方向上的像元张角。

向量 $\overrightarrow{Q_k P_{k1}}, \overrightarrow{Q_k P_{k2}}$ 在地心坐标系下分别表示为 $\overrightarrow{Q_k P_{k1}} = (x'_{k1}, y'_{k1}, z'_{k1}), \overrightarrow{Q_k P_{k2}} = (x'_{k2}, y'_{k2}, z'_{k2})$, 其中,

$$\begin{pmatrix} x'_{k1} \\ y'_{k1} \\ z'_{k1} \end{pmatrix} = M_k^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_{k1} \\ y_{k1} \\ z_{k1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x'_{k2} \\ y'_{k2} \\ z'_{k2} \end{pmatrix} = M_k^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_{k2} \\ y_{k2} \\ z_{k2} \end{pmatrix} \quad (21)$$

上式中, M_k 为地心坐标系到相应传感器坐标系的转换矩阵。相机 1 光心所在点 Q_1 与向量 $\overrightarrow{Q_1 P_{11}}, \overrightarrow{Q_1 P_{12}}$ 确定平面 A , 其方程为:

$$\begin{aligned} & (y'_{11}z'_{12} - y'_{12}z'_{11})(x - q_{1x}) + \\ & (x'_{12}z'_{11} - x'_{11}z'_{12})(y - q_{1y}) + \\ & (x'_{11}y'_{12} - x'_{12}y'_{11})(z - q_{1z}) = 0 \end{aligned}$$

相机 2 光心所在点 Q_2 与向量 $\overrightarrow{Q_2 P_{21}}, \overrightarrow{Q_2 P_{22}}$ 确定平面 B , 其方程为:

$$\begin{aligned} & (y'_{21}z'_{22} - y'_{22}z'_{21})(x - q_{2x}) + \\ & (x'_{22}z'_{21} - x'_{21}z'_{22})(y - q_{2y}) + \\ & (x'_{21}y'_{22} - x'_{22}y'_{21})(z - q_{2z}) = 0 \end{aligned}$$

平面 A 和平面 B 的交线, 即为目标三维轨迹最小方差投影直线 l 。

步骤 3. 弹道面估计步骤:

在直线 l 上任取两点 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) , 代入弹道面方程 $X + bY + cZ = 0$, 得到方程组:

$$\begin{cases} x_1 + by_1 + cz_1 = 0 \\ x_2 + by_2 + cz_2 = 0 \end{cases} \quad (22)$$

解出参数 b, c 值, 即得到了弹道面方程。

步骤 4. 导弹轨迹点重建, 其过程为:

计算传感器像面上每个轨迹点 $U_{ki}(u_{ki}, v_{ki})$ 到相应传感器光心 Q_k 所构成的向量在地心直角坐标系下的表示 $\overrightarrow{U_{ki} Q_k} = (x_{cki}, y_{cki}, z_{cki})$:

$$\begin{pmatrix} x_{cki} \\ y_{cki} \\ z_{cki} \end{pmatrix} = M_k^{-1} \cdot \begin{pmatrix} z_{ki} \tan((u_{ki} - u_0) \cdot \varphi_y) \\ z_{ki} \tan((v_{ki} - v_0) \cdot \varphi_x) \\ z_{ki} \end{pmatrix} \quad (23)$$

目标轨迹重建点在地心直角坐标系下的坐标为 (x_i, y_i, z_i) :

$$\begin{cases} x_i = q_{kx} + x_{cki}t \\ y_i = q_{ky} + y_{cki}t \\ z_i = q_{kz} + z_{cki}t \end{cases} \quad (24)$$

其中 t 为待求比例系数, 联立式(24) 和弹道面方程 $x_i + by_i + cz_i = 0$ 可以得到 (x_i, y_i, z_i) 的值, 从而实现了导弹轨迹点的重建。

3 实验结果及分析

3.1 不同射程导弹的重建距离误差及射向估计误差

实验中两个扫描相机位于地球同步轨道上, 与地心连线之间的夹角为 70° , 扫描相机成像周期为 2s, 目标成像点采样误差 $3\sigma = 0.1\text{pixel}$, 传感器指向误差为 $3\sigma = 10\mu\text{rad}$, 分别对射程为 1000km、3500km 和 10000km 的导弹主动段轨迹利用 PCA 方法进行重建, 得到的实验结果如图 3 至图 5 所示。

为了衡量 PCA 方法的重建及射向估计效果, 表 1 和表 2 分别统计了立体视觉方法和 PCA 方法对不同射程导弹的重建距离误差及射向角度误差的均值、标准差。由表 1 和表 2 可知, 在目标轨迹成像点采样误差为 0.1 像素, 传感器指向误差为 $10\mu\text{rad}$ 时, 对不同射程的弹道, PCA 方法得到的目标点重建距离误差和射向估计误差都比立体视觉方法更小。为了分析 PCA 方法得到的主成分反映综合信息的能力, 表 3 列出了不同射程的导弹轨迹在两个像面的特征值和及其贡献率^[7], 由表 3 可知, 对于不

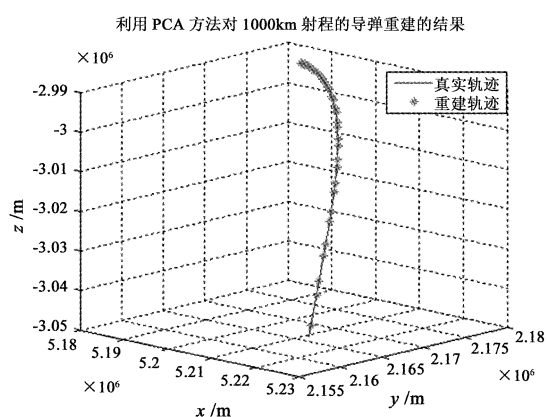


图 3 利用 PCA 方法对 1000km 射程导弹重建的结果
Fig. 3 Reconstruction results for 1000km range missile using PCA method

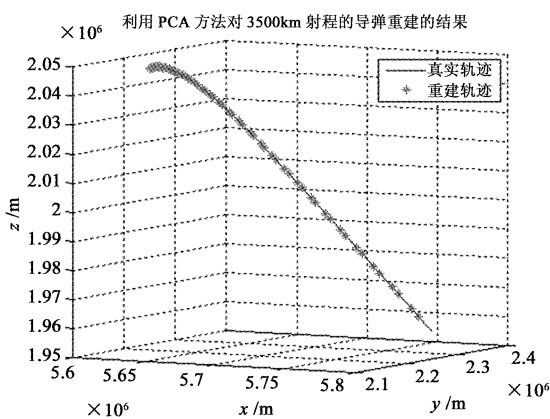


图 4 利用 PCA 方法对 3500km 射程导弹重建的结果
Fig. 4 Reconstruction results for 3500km range missile using PCA method

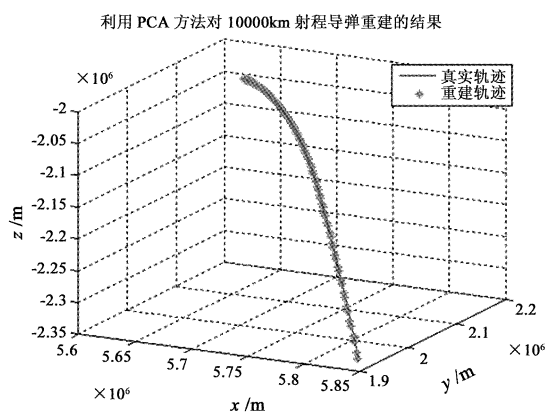


图 5 利用 PCA 对 10000km 射程导弹重建的结果
Fig. 5 Reconstruction results for 10000km range missile using PCA methods

同射程的导弹轨迹,最大特征值的贡献率达到 98%

以上,使得提取主成分时目标轨迹信息损失很小。

表 1 利用立体视觉方法得到的目标重建距离误差、射向估计误差

Table 1 Reconstruction error and course estimation error using stereoscopic vision method

导弹射程/km	重建距离误差的均值 /m	重建距离误差的标准差 /m	射向估计误差均值 /($^{\circ}$)	射向估计误差标准差 /($^{\circ}$)
1000	577.4437	261.9026	0.2022	0.1607
3500	574.2063	263.3069	0.0335	0.0264
10000	575.5447	260.2994	0.0122	0.0093

表 2 利用 PCA 方法得到的目标重建距离误差、射向估计误差

Table 2 Reconstruction error and course estimation error using PCA method

导弹射程/km	重建距离误差的均值 /m	重建距离误差的标准差 /m	射向估计误差均值 /($^{\circ}$)	射向估计误差标准差 /($^{\circ}$)
1000	150.2450	72.7957	0.0696	0.0484
3500	116.8305	62.0876	0.0101	0.0072
10000	130.3598	67.5310	0.0165	0.0061

表 3 对像面轨迹进行主成分分析得到的最大特征值及其贡献率

Table 3 The biggest characteristic value and its contribution rate obtained using PCA method on missile trajectory in image plane

导弹射程/km	像面 1 最大特征值	像面 1 最大特征值的贡献率/%	像面 2 最大特征值	像面 2 最大特征值的贡献率/%
1000	3326.16	99.8042	703.08	98.7915
3500	16000.10	99.9922	52368.96	99.9999
10000	99339.01	99.9991	45914.69	99.9956

3.2 传感器指向误差和目标成像点采样误差对实验结果的影响

为了分析传感器指向误差和目标成像点采样误差对实验结果的影响,对于射程为 1000km 导弹在不同的传感器指向误差和目标成像点采样误差水平下利用两种方法进行重建。图 6 表示了 0~60s 内导弹轨迹在各个像面上的成像时刻差异,图 7 和图 8 分别表示传感器指向误差和目标成像点采样误差对目标重建和射向估计结果的影响。图 9 显示了 PCA 方法得到的射向角误差小于立体视觉方法的区域。由图 7 可知,在同一误差水平下,利用 PCA 方法得到的目标点的重建距离误差更小。由图 8 和图 9 可

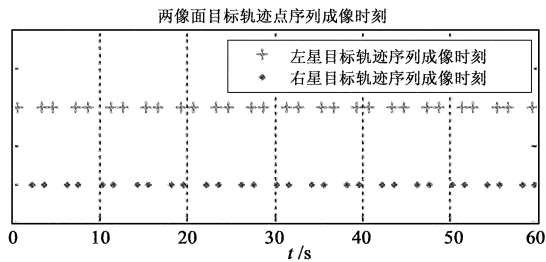


图 6 两像面上目标轨迹序列成像时刻
Fig. 6 Imaging time of target trajectory sequence in image planes

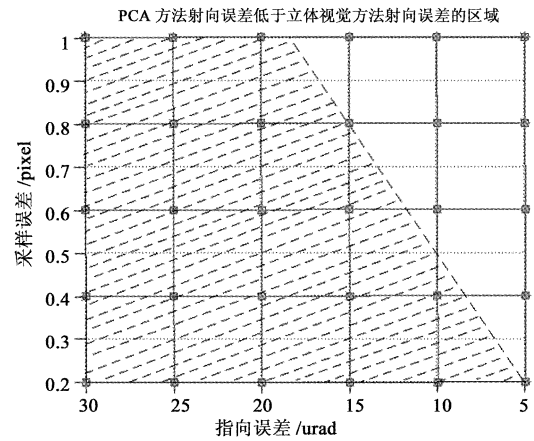


图 9 PCA 方法射向误差低于立体视觉方法射向误差的区域
Fig. 9 Course estimation area using PCA lower than using stereo vision method

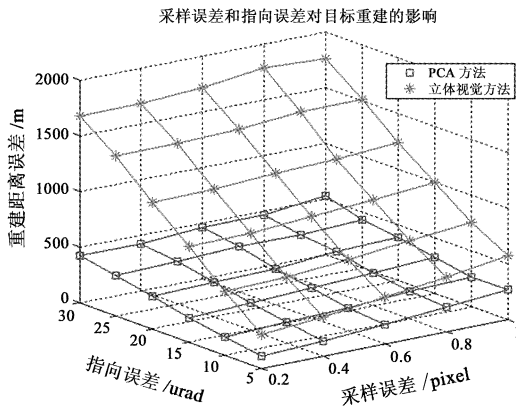


图 7 采样误差和指向误差对重建结果的影响
Fig. 7 Reconstruction results affected by different sampling error and pointing error

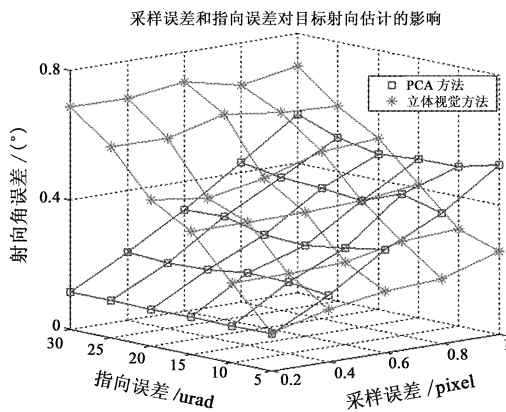


图 8 采样误差和指向误差对射向估计结果的影响
Fig. 8 Course estimation affected by different sampling error and pointing error

况下(这种情况正与实际情况相符),PCA 方法得到的射向误差远小于立体视觉方法得到的射向误差。

4 结论

本文将 PCA 方法应用到导弹轨迹的三维重建及射向估计,通过对射程和射向不同的导弹进行仿真实验证明了该方法的可靠性,分析了传感器指向误差和导弹成像点采样误差对实验结果的影响。该方法避免了立体视觉方法中同名点的插值估计带来的误差及计算量;与立体视觉方法的实验效果对比表明,在相同指向误差和采样误差水平下,PCA 方法得到的目标重建位置误差更小,在指向误差较大而导弹成像点的采样误差较小的情况下,PCA 方法得到的射向角误差更小。

参 考 文 献

[1] 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,2003:72-75.
 [2] Hearn D D, Baker M P, Carithers W R. Computer graphics with OpenGL[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
 [3] Mevey E S, Lee J W. Some accuracy and resolution aspects of computer vision distance measurements[J]. IEEE PAMI, 1982 (4): 646-649.
 [4] 王文灿,聂锋. 最小二乘重建主动段弹道及其精度分析[J]. 弹道学报,2007,19(1):24-26. [Wang Wen-can, Nie Feng. Trajectory rebuilding of power phase and its precision analysis based on LS method[J]. Journal of Ballistics,2007,19(1):24-26.]
 [5] 杨剑,吕乃光,董明利. 加权最小二乘算法在机器视觉系统中

知,PCA 方法得到的射向角估计误差受成像目标点的采样误差影响比较大,而立体视觉方法得到的射向角误差受传感器指向误差的影响比较大,在传感器指向误差较大而成像目标点的采样误差较小的情

- 的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8):1870-1877. [Yang Jian, Lv Nai-guang, Dong Ming-li. Application of weighted least square method to machine vision system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8):1870-1877.]
- [6] Duda R O, Hart P E, Stork D G. 模式分类[M]. 李宏东译. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [7] Jolliffe I T. Principal component analysis [M]. Jolliffe New York: Springer, 2002.
- [8] Abdi H, Williams L J. Principal component analysis[J]. WIREs Comp. Stat, 2010, 2(4):433-459.
- [9] Soop E M. 地球静止轨道手册[M]. 王正才, 邢国华, 张三, 等译. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [10] 梁斌, 徐文福, 李成, 等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 1-13. [Liang Bin, Xu Wen-fu, LI Cheng, et al. The status and prospect of orbital servicing in the geostationary orbit [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1):1-13.]
- [11] 张毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2005:99-144.
- [12] 申镇. 单星预警弹道导弹参数估计方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010. [Shen Zhen. The single satellite early warning ballistic missile parameter estimation research [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.]

作者简介:

左峥嵘(1969 -),男,博士,副教授,主要从事计算机视觉、模式识别等研究。

通信地址:湖北省武汉市华中科技大学逸夫科技楼 1003 室 (430074)

电话:(027)87558913

E-mail:zhrzuo@mail.hust.edu.cn

(编辑:张宇平)