

顾及同步差的 POS 系统视准轴误差检校

姚娜¹ 林宗坚² 任超锋¹ 王昌舟³

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 中国测绘科学研究院,北京市北太平路 16 号,100039)

(3 贵州贵航无人机有限责任公司,安顺市市西路 87 号,561000)

摘要:推导出 POS 系统视准轴误差检校的数学模型,提出将 POS 系统的同步差作为一项检校内容,并给出了严格的同步差估算方法。试验表明,顾及同步差的视准轴误差检校精度与转换所得的角元素精度均有明显提高。

关键词:POS;视准轴误差;外方位角元素;同步差;精度
中图法分类号:P246.1

定位定向系统(position and orientation system, POS)用于航空遥感,可直接获取摄影时刻影像的空间位置和姿态信息^[1-3]。高精度 POS 数据能大大减少地面控制点数量,对于控制点布设困难区域意义尤为重大。然而,POS 系统获取的数据需要转换成航片外方位元素才能使用。特别是角元素的转换,需要已知 POS 系统与传感器之间的视准轴误差^[4]。该误差是由于惯性测量装置(IMU)轴系与传感器的轴系在安装时不能严格平行产生的,它严重影响了航空遥感直接对地目标定位的精度,需要采用合适的检校方法予以补偿^[4]。

航空摄影测量系统的机载部分主要由传感器、POS 系统和控制器组成。其中,POS 系统由 GPS 和 IMU 组合而成。控制器负责传感器与 POS 系统的同步工作,从而获得摄影时刻影像的瞬时位置和姿态。实际上,GPS 接收机具有很准确的秒脉冲输出,通常 POS 系统会以 GPS 的每秒脉冲输出(1 PPS)为时间基准信号,定时修正整个导航系统的时序,强迫惯性时钟同步^[5]。但整秒脉冲发送的 GPS 数据仍不可能与 IMU 数据序列严格对齐^[5]。此外,POS 系统需要进行组合导航计算来实现当前位置和姿态信息的组合。

本文将 POS 系统内部主要存在的由时序对

应不齐和解算延迟所导致的同步误差统称为同步差,研究了一种在实际运动中确定并估计其误差的方法。

1 POS 系统检校原理

1.1 POS 系统角元素转换模型

若仅考虑角元素的转换,则像空间辅助坐标系 X_p 向地面坐标系 X_m 的转换可通过旋转矩阵 R_p^m 实现。一旦求出 R_p^m ,便可获得航片的外方位角元素。本文将研究使用坐标系相似变换方法,将 POS 系统的测量值进行直接转换得到旋转矩阵 R_p^m 。

由文献[6]可知, R_p^m 转换的一般过程为:像空间辅助坐标系 p -像空间坐标系 i -传感器坐标系 c -POS 坐标系 b -导航坐标系 n -地面坐标系 m 。该过程可表示为:

$$R_p^m = R_n^m \cdot R_b^n \cdot R_c^b \cdot R_i^c \cdot R_p^i \quad (1)$$

相关坐标系的定义可参考文献[6]。本文推导所得的各旋转矩阵如下:

$$R_i^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_c^b = \begin{bmatrix} \cos e_Z \cdot \cos e_Y & \cos e_Z \cdot \sin e_Y \cdot \sin e_X - \sin e_Z \cdot \cos e_X & \cos e_Z \cdot \sin e_Y \cdot \cos e_X + \sin e_Z \cdot \sin e_X \\ \sin e_Z \cdot \cos e_Y & \sin e_Z \cdot \sin e_Y \cdot \sin e_X + \cos e_Z \cdot \cos e_X & \sin e_Z \cdot \sin e_Y \cdot \cos e_X - \cos e_Z \cdot \sin e_X \\ -\sin e_Y & \cos e_Y \cdot \sin e_X & \cos e_Y \cdot \cos e_X \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_p^i = \begin{bmatrix} \sin(\text{cam}) & \cos(\text{cam}) & 0 \\ -\cos(\text{cam}) & \sin(\text{cam}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_b^n = \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\theta & \cos\phi \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi - \sin\phi \cdot \cos\phi & \cos\phi \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi + \sin\phi \cdot \sin\phi \\ \sin\phi \cdot \cos\theta & \sin\phi \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi + \cos e_Z \cdot \cos e_X & \sin\phi \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi - \cos\phi \cdot \sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta \cdot \sin\phi & \cos\theta \cdot \cos\phi \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_n^m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_p^m = \begin{bmatrix} \cos\omega \cdot \sin\kappa + \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa - \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa & -\sin\omega \cdot \cos\varphi \\ \sin\omega \cdot \sin\kappa - \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \sin\omega \cdot \cos\kappa + \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa & \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{bmatrix}$$

其中, cam 为传感器相对于 POS 系统的安置角, 在实际中, 特别是随着组合相机的广泛使用, 安置角的取值为集合 $\{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$; ϕ 、 θ 和 ψ 分别为 POS 系统测量的滚转角、俯仰角和航偏角; e_X 、 e_Y 和 e_Z 分别为传感器的视准轴误差; ω 、 φ 和 κ 为航片对应的外方位角元素。

1.2 POS 系统视准轴误差检校的数学模型

式(1)描述了 POS 系统测量姿态角向航片外方位角元素转换的严格数学模型。反之, 若能够通过常规的光束法区域网平差获得航片的外方位角元素, 即解算得出 \mathbf{R}_p^m , 则式(1)成为解算 \mathbf{R}_c^b 的依据。

摄影测量可利用微小转角对各转角的近似值按各角的改正值修正^[7]。据此, 可将旋转矩阵 \mathbf{R}_c^b 表示为:

$$\mathbf{R}_c^b = d \mathbf{R}_c^b \cdot (\mathbf{R}_c^b)^0 \tag{2}$$

式中, $(\mathbf{R}_c^b)^0$ 是将视准轴误差 e_X 、 e_Y 、 e_Z 的近似值 e_X^0 、 e_Y^0 、 e_Z^0 代入式(1)中严密的 \mathbf{R}_c^b 矩阵而得。近似值的初值可依据传感器与 POS 系统安装轴线的夹角进行粗估。例如, 本文传感器与 POS 系统的安装轴线基本平行, 因此初始运算中所设定的 e_X^0 、 e_Y^0 和 e_Z^0 均为 0。如此, 视准轴误差近似值的改正值 de_X 、 de_Y 、 de_Z 便可满足微小转角的前提。此时, $d \mathbf{R}_c^b$ 可简化为:

$$d \mathbf{R}_c^b = \begin{bmatrix} 1 & -de_Z & de_Y \\ de_Z & 1 & -de_X \\ -de_Y & de_X & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

进一步地, 将式(2)代入式(1), 可得:

$$\mathbf{R}_p^m = \mathbf{R}_n^m \cdot \mathbf{R}_b^n \cdot d \mathbf{R}_c^b \cdot (\mathbf{R}_c^b)^0 \cdot \mathbf{R}_i^c \cdot \mathbf{R}_p^i \tag{4}$$

式中各旋转矩阵均为正交矩阵, 因此该式可转变为:

$$\mathbf{R}_p^m \cdot ((\mathbf{R}_c^b)^0 \cdot \mathbf{R}_i^c \cdot \mathbf{R}_p^i)^T = \mathbf{R}_n^m \cdot \mathbf{R}_b^n \cdot d \mathbf{R}_c^b \tag{5}$$

若令 $\mathbf{B} = \mathbf{R}_p^m \cdot ((\mathbf{R}_c^b)^0 \cdot \mathbf{R}_i^c \cdot \mathbf{R}_p^i)^T =$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{R}_n^m \cdot \mathbf{R}_b^n = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}, \text{ 并将其代入}$$

式(5)展开重组, 可得到误差方程的矩阵形式:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x} - \mathbf{l}_i \tag{6}$$

$$\text{其中, } \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & -D_{13} & D_{12} \\ D_{13} & 0 & -D_{11} \\ -D_{12} & D_{11} & 0 \\ 0 & -D_{23} & D_{22} \\ D_{23} & 0 & -D_{21} \\ -D_{22} & D_{21} & 0 \\ 0 & -D_{33} & D_{32} \\ D_{33} & 0 & -D_{31} \\ -D_{32} & D_{31} & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} B_{11} - D_{11} \\ B_{12} - D_{12} \\ B_{13} - D_{13} \\ B_{21} - D_{21} \\ B_{22} - D_{22} \\ B_{23} - D_{23} \\ B_{31} - D_{31} \\ B_{32} - D_{32} \\ B_{33} - D_{33} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{x} = [de_X \ de_Y \ de_Z]^T$; i 为像片编号。

分析可知, 矩阵 \mathbf{B} 与 POS 系统的量测值 ϕ 、 θ 和 ψ 及近似值 e_X^0 、 e_Y^0 、 e_Z^0 相关。当给定近似值的初值后, 矩阵 \mathbf{B} 即为已知量。矩阵 \mathbf{D} 与航片的外方位角元素 ω 、 φ 和 κ 相关, 可通过含有若干已知控制点的航片进行事后空三解求。此时, 式(6)中的未知量为视准轴误差的改正值 de_X 、 de_Y 、 de_Z 。该式便成为 POS 系统视准轴误差检校的数学模型。而一张航片可列出三个独立方程, 解算三个独立的未知量。因此, 若有 n 张已知地面控制点的航片, 则根据最小二乘原理可得:

$$\mathbf{x} = \left(\sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_i^T \cdot \mathbf{A}_i) \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_i^T \cdot \mathbf{l}_i) \right) \tag{7}$$

由于在解算过程中使用了视准轴误差的近似值 e_X^0 、 e_Y^0 、 e_Z^0 , 因此式(7)须迭代运算。当视准轴误差的改正值 de_X 、 de_Y 、 de_Z 均小于某一值时, 迭代结

束(本文取 0.000 01°)。若迭代 m 次,则 POS 系统的视准轴误差为近似值与 m 个迭代改正值之和。

1.3 POS 系统同步差的估算

前已述及,对于一张外方位角元素已知的航片,可以解算出一组视准轴误差。因此,若存在 n ($n \geq 2$)张外方位角元素已知的航片,便可以解算出 n 组视准轴误差。以这 n 组视准轴误差作为同精度观测值,可计算该组航片的视准轴误差的中误差。下文以视准轴误差分量 e_x 的中误差推导为例。

将第 i 张航片解算所得的 e_x^i 作为观测值,则对于 n 张航片,根据最小二乘间接平差原理可知

$$v_i = \sum_{i=1}^n e_x^i / n - e_x^i \quad (8)$$

则视准轴误差分量 e_x 的中误差为:

$$\sigma_{e_x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2 / (n - 1)} \quad (9)$$

同理可得 e_y 和 e_z 的中误差。则视准轴误差的中误差 σ 为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{e_x}^2 + \sigma_{e_y}^2 + \sigma_{e_z}^2} \quad (10)$$

在一定的安装周期内,视准轴误差可视为一个定值。因此,若 POS 系统不含同步差,则每组内 n 张航片计算所得的 n 组视准轴误差应近似相等,此时视准轴误差的中误差应为最小。而当 POS 系统含有同步差(假设为常量 ΔT)时(如图 1 所示),会导致 POS 系统的实际测量姿态轨迹(实曲线)右移,进而导致在曝光时刻 N 处内插所得的姿态存在 $\Delta\omega_N$ (竖实线)的偏差,且不同的曝光时刻偏差不同,在图中表示为 $\Delta\omega_N \neq \Delta\omega_{N+1}$ 。

不难理解,传感器在 n 个曝光时刻所获得的 POS 系统量测值的不同偏差会导致解算所得的 n 组视准轴误差的不同偏差,相应的中误差也增大。因此,本文以中误差为依据,按如下步骤进行同步差估算:

1) 以 n 张($n \geq 2$)航片为一组,在一定范围内改变同步差 ΔT 的大小,形成一个递减的同步差序列。本文设初始 ΔT 为 0.5 s,递减步长设为 0.01 s(与本文所选 POS 系统的数据更新频率一致),即 $\Delta T \in [0, 0.5]$;

2) 对于组内的各单张航片,依据 GPS 记录的各摄影时刻均向前追溯 ΔT ,再内插提取相应的 POS 系统姿态数据,并将其视作摄影时刻的实际姿态;

3) 在同步差序列中每取一个 ΔT ,计算其对应的视准轴误差的中误差 σ ;

4) 将最小中误差所对应的 ΔT 作为对 POS 系统同步差的估算。因此,式(10)可转换为以 ΔT 为离散参数的离散随机过程,即

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\sigma_{e_x(\Delta T)}^2 + \sigma_{e_y(\Delta T)}^2 + \sigma_{e_z(\Delta T)}^2} \quad (11)$$

当 $\sigma_{\Delta T}$ 最小时,其所对应的 ΔT 即为估算的 POS 系统同步差。式(11)建立了视准轴误差的中误差与同步差之间的关系,为同步差的估算提供了依据。

2 试验及其结果分析

2.1 试验设备及其设计

试验所用的传感器为自行研制的四拼组合宽角相机。该相机等效主距为 35 mm,视场角为 $66^\circ \times 66^\circ$,焦面长宽为 7 168 像元 \times 7 168 像元。试验所采用的飞行平台为国产“鸢鹰”长航时无人机,机载导航系统为国内某所研制的 POS 系统。其理论定位误差为(10mm+1 ppm),姿态角测量精度为 0.05°,数据更新频率为 0.01 s。POS 系统与组合宽角相机之间实现刚性连接。

在飞行试验区内,均匀布设 40 个地面控制点,相邻控制点的南北平均间隔约 70 m,东西平均间隔约 65 m,测量精度为 1 cm。图 2 是由本文所用传感器获取的一幅四拼影像,该影像基本涵盖了试验区内布设的控制点(实心圆标识)。控制点采用面积为 0.4 m \times 0.4 m 的深浅相间的正方形面板(图 3),其在影像上的成像效果参见图 4。为了避免地球曲率和子午线偏差对检校结果的影响,控制点坐标系采用局部地理坐标系。保持传感器及 POS 系统状态稳定,共飞行两个架次,相对航高均为 400 m,分别获取有效航片 14 张和 12 张,共计 26 张。本文中的有效航片是指航片至少包含试验区内的 9 个控制点的航片。

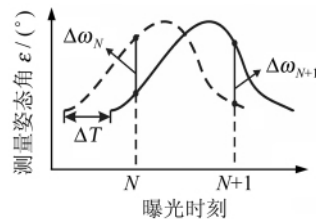


图 1 同步差导致的曝光时刻姿态偏差

Fig.1 Attitude Deviation at Each Exposure Resulted from Synchronization Error



图 2 控制点分布影像

Fig.2 Image of Control Points Distribution

2.2 试验步骤及分析

本文首先验证同步差的客观存在,其次验证同步差的准确性与有效性。

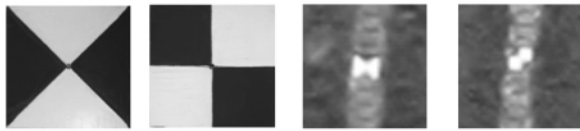


图3 控制点标志
Fig. 3 Signs of Control Points

图4 控制点影像
Fig. 4 Images of Control Points

首先,以相邻有效航片为一组(即 $n=2$)进行

同步差估算,其结果参见表1。显然,相对于本文POS系统0.01 s的数据更新频率,同步差客观存在且不容忽略。同时,两个架次依据相邻航片计算的同步差均以0.14 s为平均值做上下扰动。相对于该平均同步差,0.03 s的偏差在可接受的范围内。按照相同的方法,将第一架次所有航片作为一组,第二架次所有航片作为另一组,计算其同步差,结果均为0.14 s。因此,同步差的上下扰动的性质为随机误差,可以通过最小二乘平差消除。

表1 两个架次相邻航片组合所估算的同步差/s

Tab. 1 Estimated Synchronization Errors of Each Two Neighboring Aerial Images of Two Flights/s

第一架次同步差	0.13	0.12	0.11	0.12	0.14	0.16	0.13	0.13	0.15	0.14	0.13	0.15
第二架次同步差	0.15	0.13	0.13	0.15	0.16	0.12	0.15	0.14	0.16	0.15	-	-

其次,本文将0.14 s作为试验所用POS系统的固有同步差,利用第一架次的14张航片进行视准轴误差的检校,利用第二架次的12张航片验证检校结果。为此,将第一架次航片摄影时刻对应的姿态数据与消除同步差后所得的姿态数据分别代入式(7)进行单片视准轴误差检校,结果参见图5。可见,未考虑同步差的视准轴误差的波动幅度较大;而顾及同步差的视准轴误差的检校结果更加稳定,符合视准轴误差为一常量的检校基础。统计两者的中误差,结果参见表2。显然,顾及同步差的视准轴误差的中误差明显减小,表明其检校精度更为优良。

图6中,横坐标代表第二架次的航片序号,纵坐标表示外方位角元素的残差。可见,顾及同步差的角元素残差基本控制在 $\pm 0.05^\circ$ 以内,明显优于不顾及同步差的结果。本文的空三加密精度小于0.4个像素,依据传感器的焦距及相对航高,其地面分辨率为7.3 cm,则0.4个像素对应地面宽度约为2.9 cm,约折合角度 0.004° 。因此,空三加密结果误差对POS系统角元素转换的影响甚微,可将其作为真值计算角元素的残差。两组外方位角元素残差的中误差同样参见表2。显然,在顾及同步差的前提下,各角元素残差的中误差明显减小,表明其实际精度有显著提升。

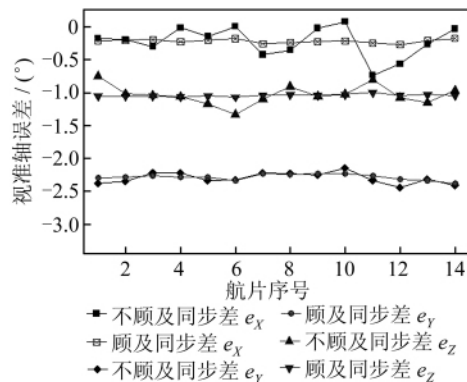


图5 视准轴误差检校结果
Fig. 5 Calibration Results of Boresight Misalignment

表2 中误差对比/ $^\circ$

Tab. 2 Comparison of Standard Deviations/ $^\circ$

同步差	视准轴误差			外方位角元素残差		
	e_x	e_y	e_z	ω	φ	κ
不顾及	0.238	0.081	0.152	0.239	0.094	0.123
顾及	0.026	0.037	0.019	0.045	0.033	0.031

综上所述,POS系统客观存在的同步差对视准轴误差的检校精度有一定的影响,进而影响POS系统测量姿态向航片外方位角元素的转换精度。利用本文方法解算出的同步差,能够基本消除POS系统固有的同步差影响。

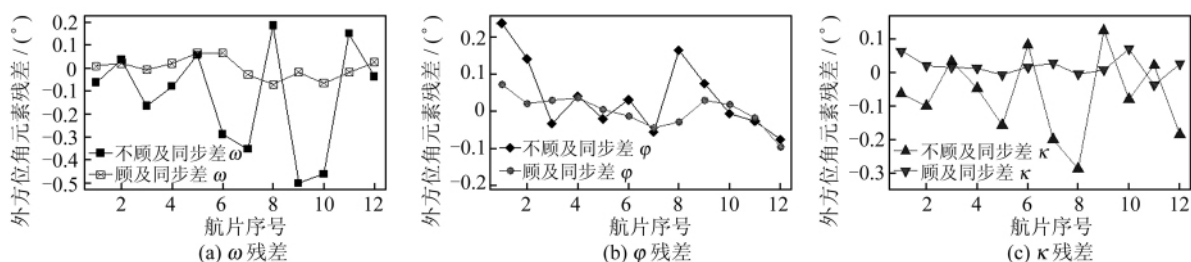


图6 不顾及同步差与顾及同步差的外方位角元素残差

Fig. 6 Comparisons of Residuals of Exterior Orientation Angular Elements with and Without Considering Synchronization Error

参 考 文 献

- [1] 袁修孝,张雪萍,付建红. 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 角元素的转换方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(3):338-344
- [2] Cramer M, Stallmann D, Haala N. Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3):198-205
- [3] 袁修孝,付建红,左正立,等. 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(10):847-850
- [4] 袁修孝,杨芬,赵青,等. 机载 POS 系统视准轴误差检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12):1 039-1 043
- [5] 崔红霞. 无人机低空数码摄影测量系统研究[D]. 武汉:武汉大学, 2006
- [6] 刘军,王冬红,张永生. GPS/INS 系统 HPR 与 OPK 角元素的剖析与转换[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 54-56
- [7] Chebeane H, Echalié F. Towards the Use of a Multi-agents Event Based Design to Improve Reactivity of Production System[J]. Computers and Industrial Engineering, 1999, 37(1-2):9-13

第一作者简介:姚娜, 博士生, 研究方向为遥感影像信息度量与不确定性分析, 低空无人机摄影测量。

E-mail:nayao@foxmail.com

Boresight Misalignments Calibration of POS System Considering Synchronization Error

YAO Na¹ LIN Zongjian² REN Chaofeng¹ WANG Changzhou³

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 Beitaping Road, Beijing 100039, China)

(3 Guizhou Guihang Unmanned Aerial Vehicles Limited Liability Company, 87 Shixi Road, Anshun 561000, China)

Abstract: The function model of boresight misalignments calibration is derived, and the synchronization error of POS system is considered as an item of calibration, and a strict estimation method for the error is put forward. The experimental results show that the accuracies of calibrated boresight misalignments and angular elements conversation are remarkably improved while considering the synchronization error.

Key words: POS; boresight misalignments; exterior orientation angular elements; synchronization error; accuracy

About the first author: YAO Na, Ph.D candidate, majors in information amounts and uncertainty analysis of remote sensing imagery and low altitude photogrammetry by unmanned aircraft vehicles.

E-mail: nayao@foxmail.com

(上接第 175 页)

constrained least squares algorithm and RANSAC algorithm. The feasibility and accuracy of the proposed method have been verified using the point clouds acquired by RIEGL VZ-400 laser scanner, and the practical significance for applications of 3D laser scanning is reflected to some extent.

Key words: tunnel deformation monitoring; vertical section abstraction; quadric fitting; 3D laser scanning; random sample consensus

About the first author: TUO Lei, postgraduate, majors in analysis and processing of terrestrial laser scanning data.

E-mail: tlbeijing@foxmail.com