

GPS 技术在滑坡监测中的应用

李天文¹, 吴琳¹, 李家权²

(1. 西北大学城市与资源学系, 陕西 西安 710069; 2. 长安大学地测学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:探讨了应用 GPS 技术进行滑坡监测的原则和方法, 结合向阳技校滑坡的实际监测资料对这一方法进行了论证。并通过对几年来观测数据的综合分析, 得出了滑坡体位移的大小和方向和对该地区地表以及位于滑坡体上的建筑物造成的影响, 提出了滑坡预测模型, 进而利用该模型和监测数据对滑坡进行了预报, 从而对该地区的防灾工作具有重要的意义, 也为 GPS 技术在变形监测中的应用提供了重要的参考价值。

关键词:滑坡体; GPS; 变形监测; 基准点

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

1 GPS 滑坡监测

1. 1 监测内容与网的布设

滑坡监测内容包括: 滑坡体与地表水平位移的监测; 地表的垂直位移监测; 监测区内建筑物的沉降观测(采用精密水准测量)。

结合布网的要求, 以及滑坡地区的地理条件, 采取相应的布网方式。

1. 2 监测仪器和数据处理

监测工作通常采用至少 4 台高精度全自动 GPS 信号接收机进行同步观测, 观测期间卫星状态要保持良好。PDOP 值一般小于 4, 数据处理采用 Locus processor 软件解算基线向量。

对每期的观测数据采用自由网进行平差处理并进行比较, 考察基准点的相对位移是否在观测精度范围内, 是否稳固。各期计算结果中各 GPS 监测点的点位误差必须达到设计精度要求, 以发现滑坡体与地表各 GPS 点的位移量。

向阳技校位于陕西蓝田县东南, 属于秦岭北坡地区, 该滑坡体地质构造是由位于下层的滑坡层和覆盖其上的沉积沙土层构成的, 属于古滑坡体胶合处。据地质资料考证, 该滑坡体曾经出现过滑动, 滑坡倾角较小, 为 5° 左右。向阳技校福利区就位于该沙土层上, 初建时对滑坡状况不甚了解。

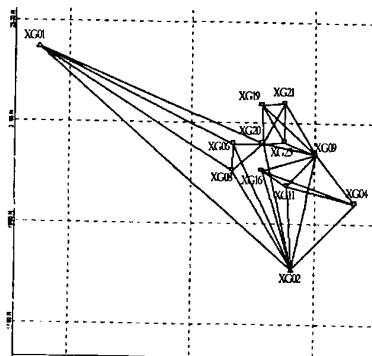


图 1 GPS 监测网示意图

Fig. 1 Sketch map of GPS inspection

2 监测区域及 GPS 监测结果

2. 1 监测区概况

对向阳技校的 GPS 测量是于 2000- 12- 03 开始进行的, 监测的目的是研究福利区东墙外滑坡体的位移与位于滑坡体上的福利区地表自 1997 年来

收稿日期(Received date): 2004- 04- 11; 改回日期(Accepted): 2004- 07- 15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金 State Natural Science Fund(40271089); 美国国家基金 America State Fund(ASF EAR0125968); 教育部重大科学技术研究项目 Ministry of Education Technology Research Item

作者简介(Biography): 李天文, 男(1957-), 陕西户县人, 西北大学城市与资源学系副教授, 多年来一直从事全球定位系统、地理信息系统工程等方面的科研和教学。[LI Tianwen (1957-), Associate professor of Northwest University, specialized in Global Position System(GPS), Engineering surveying and mapping and GIS-based spatial analysis.]

的位移变化及发展趋势,对可能出现的危机进行报警,以避免滑坡和沉降对该地区造成重大损失。根据建筑物的变形监测精度要求,结合该地区的实际情况,要求各观测点位移中误差 $\leq 1\text{mm}$,因此采用一级变形测量等级。

2.2 监测区网的布设

在形变区域之外和滑坡体上分别选定一个国家控制点作为基准点;另外再选 10 个分布较为合理的监测点。其具体位置如图 1。监测网包含 GPS 监测网与常规监测网的部分网点,其中 1 号点和 2 号点为基准点,1 号点位于滑坡体外较为稳定的地方,2 号点位于滑坡体上福利区地表,用钻孔方法将此点与基岩相固定于滑坡体之外 500 m 处,因此处于稳定状态。其余各点为观测点,均匀分布于福利区各处及各建筑物附近。

2.3 监测结果

1. 福利区水平位移监测结果

根据 GPS 测量得到各水平位移监测点的三维坐标(表 1)和图 2。

2. 地表垂直位移监测结果

为进一步了解此滑坡体对于向阳技校福利区地表造成的影响,还对福利区内几个参考点打桩进行精密水准测量。测量范围不仅包括 GPS 监测网中的几个参考点还包括分布于几栋建筑物楼角的独立打桩点,这些点分布较好,有利于对整个福利区地表垂直位移的全面监测。经监测,福利区各监测桩桩顶垂直位移量如表 2。

3. 福利区建筑沉降监测结果

要研究此滑坡体对地物的影响情况,只研究地表的水平、垂直位移是不够的,还要研究滑坡对建筑物的影响,一般反映在建筑物的沉降量上。因此在

利用 GPS 对地表垂直位移监测的基础上,又利用精密水准测量对福利区 10 栋建筑物的各墙角的沉降量进行了监测,监测结果如表 3。

表 1 4 a 水平位移数据表(mm)
Table 1 4 years' data of level displacement. (mm)

点名	x 方向 累积位移	y 方向 累积位移	累交累积位移	位移方向
XG20	+ 9.0	- 22.0	23.76	29°14'56"
XG09	+ 35.0	- 57.0	66.8	30°13'05"
XG16	+ 14.0	- 22.0	26.1	30°24'12"
XG04	+ 65.0	- 78.0	101.5	30°48'20"
XG11	+ 21.0	- 68.0	71.2	28°09'42"
XG02	0.0	0.0		
XG06	- 7.0	- 5.0	8.6	21°32'16"
XG08	- 4.0	- 2.0	6.9	20°33'54"
XG01	0.0	0.0		
XG19	- 45.0	- 32.0	55.2	32°34'58"
XG21	+ 14.0	+ 1.0	14.0	4°05'08"
XG23	+ 45.0	- 7.0	45.5	35°09'29"

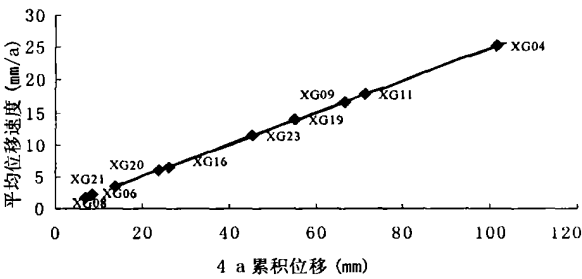


图 2 水平位移速度曲线图
Fig. 2 Curved line of level displacement velocity

表 2 福利区各监测桩桩顶垂直位移量表(mm)
Table 2 Vertical displacement on top of each stake in Fu Li district(mm)

点 名	6	8	16	19	21	11	10- 3	8- 1	8- 4	5- 1	7- 3	5- 4	1- 4	3- 2	3- 3	2- 1
沉降量	+ 0.4	+ 0.5	- 5.9	+ 0.9	+ 2.6	+ 1.4	+ 0.5	- 1.3	+ 1.7	- 2.2	+ 0.7	+ 0.2	- 3.2	- 1.8	- 0.4	- 7.4
备 注								房角	房角	房角	房角	房角	房角	房角	房角	房角

表 3 房角沉降量监测结果(mm)
Table 3 Inspection result of comers of building' s sinking quantum(mm)

楼 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
沉降量	- 1.7 - 2.3 - 0.8 - 3.2	- 8.6 - 0.7 - 7.4 - 1.4	- 2.2 - 2.2 - 1.6 + 0.4	- 0.8 - 2.0 - 0.4 - 2.8	- 2.2 + 0.4 - 0.9 + 0.2	+ 0.8 + 1.9 - 1.2 - 0.4	+ 0.3 + 0.3 + 0.3 0.0	- 1.5 + 1.7 + 0.3	- 0.5 + 1.4 - 2.2 + 2.8	- 2.7 + 0.5 - 1.4 - 1.1

3 数据分析

3.1 水平位移分析

根据表 1 的数据, 可得到滑坡体和福利区地表年平均水平位移场(图 3)。该图反映了点位在平面上的位置变化和方向, 为更直观的反映出各点水平位移的大小和方向, 以及整个滑坡的主轴线方向, 又根据各点在两个坐标轴方向的偏移量制作了各点的水平位移矢量图(图 4), 其中 2 号点为零偏移量点。

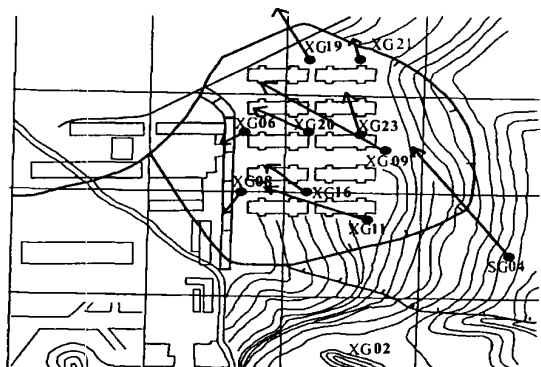


图 3 滑坡体与福利区年平均水平位移场

Fig. 3 Year average level displacement of coast and Fu Li district

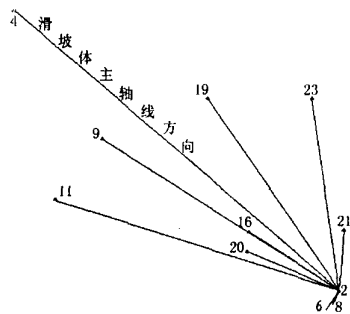


图 4 水平位移矢量图

Fig. 4 Vectorgraph of level displacement

通过上述数据与图表可以看出:

1) 位于滑坡体上的观测点 XG04 的位移方向是此滑坡体的主轴线方向, XG09、XG11、XG19 和 XG23 四点, 水平位移也较为显著, 自 1996-12 以来, 年平均水平位移量达 20 mm, 年平均水平位移方向 299° , 位移与滑坡体主轴线方向一致, 即最近几年, 滑坡体每年正以 20 mm 的平均速度向西北方向移动。

2) 位于福利区 1~6 号楼附近的 XG20、XG16、XG21 等点, 由于离滑坡体较近, 其水平位移也较为明显, 位移与滑坡体主轴线基本一致。

3) 位于 7~10 号楼附近的 XG06、XG08 两点, 由于离福利区和教学区的排水沟很近, 坡体位移在此受阻, 因此相对于其它监测点水平位移不明显, 年平均水平位移仅 2.0 mm 左右, 而且位移方向也折向了西南方。

由以上分析得最近几年间, 滑坡蠕变明显, 坡体正向西北方向滑动, 其运动速度在围墙外的坡体上较大, 在围墙内逐渐减弱, 到排水沟附近完全受阻。这是由于排水沟一方面对滑坡体有阻挡作用, 另一方面排水沟能及时将滑坡地区的水带走, 从而避免容易形成造成险情的过水层(位于滑坡层和沙土层之间, 容易加大滑坡运动造成险情)。

3.2 垂直位移分析

根据表 2 对各监测桩桩顶的垂直位移量作等值线图(图 5)可知, 16 号点和 2 号楼西南角下沉显著, 分别为 5.9 mm、7.4 mm。福利区由于滑坡移动引起地表移动, 已经在此形成了以 16 号点附近地区为中心的沉降带, 中心沉降量达 7 mm 左右, 边缘部分约为 2~3 mm, 位于沉降带两侧的地表有微弱的隆起, 最大值为 2.6 mm, 由等值线图疏密程度可看出其走向与滑坡主轴线一致。

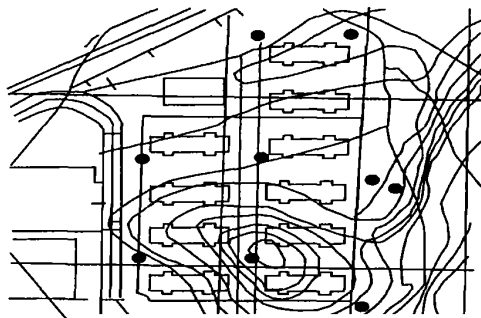


图 5 福利区地面垂直位移等值线

Fig. 5 Isolines of ground vertical displacement in Fu Li district sinking quantum

由此可得, 福利区地表除 16 号点附近沉降量极大外, 其余各点变化均不明显。滑坡体不仅造成 16 号点附近的沉降带, 还在此沉降带两侧造成地面隆起。说明福利区地面蠕变处于不稳定状态。

3.3 建筑物沉降监测分析

由表 3 的数据可以看出, 位于福利区沉降带上

的 2 号楼西墙的两个墙角变化最为显著。2 号楼西南角和西北角沉降量分别达 - 7.4 mm 和 - 8.6 mm, 远超过其他楼角的沉降量。由于整体沉降不均匀, 2 号楼墙体开裂也很严重, 与其邻近的 1 号楼沉降亦很明显; 9 号楼墙体裂缝已有多, 本期监测显示其沉降还在继续。

3.4 误差分析与改进

在高精度 GPS 测量中, 影响定位精度主要因素有: 多路径效应、相位中心改正、对流层折射修正精度、周跳影响以及操作时仪器的对中整平误差等。根据监测区的实际情况对上述误差分别进行了分析和改进。例如为消除多路经效应, 在接收机天线外加屏蔽板或避免在强反射地区进行信号接收; 在每期监测前采用仪器鉴定使相位中心改正误差减少到最小; 用随机过程模拟对流折射偏差, 或增加观测时段、选择天气状况较理想的观测时间以减小该项误差的影响; 采用多时段观测和对对中器进行检校的方法尽量削弱仪器对中误差, 采用多次量取争取降低仪器高误差, 采取对水准器进行检校等方法使偶然误差在操作中减少等等。

4 平面变形预报

由以上分析可知, 此滑坡确实对该地区的地表和建筑物造成了一定影响, 若继续发展可能会给这一地区带来险情。为了提早发现可能出现的险情并早作准备, 可对滑坡作平面变形预报, 研究它在此后几年的运动情况, 分析其出现危险的可能性大小, 以便及时采取措施。

4.1 预报方法

滑坡形变预报可以采用如下数学模型

$$\begin{aligned} \Delta X &= a_1x^2 + b_1xy + c_1y^2 + z_1x + d_1y + e_1xt^2 \\ &\quad + e_1yt^2 + f_1xt + f_1yt + g_1 \\ \Delta Y &= a_2x^2 + b_2xy + c_2y^2 + z_2x + d_2y + e_2xt^2 \\ &\quad + e_2yt^2 + f_2xt + f_2yt + g_2 \end{aligned}$$

其中 x, y 为点位坐标值, $\Delta X, \Delta y$ 为变形量, t 为自第一期起点的变形时间, 单位为年, 其余均为参数。

采用最小二乘原理进行平差, 求得参数, 在此基础上进行预报, 这是根据几期变形观测的数据求得的经验公式。

根据监测区的 GPS 监测数据可以将上述模型简化为两个以时间 t 为变量的线性方程组:

$$\begin{aligned} \Delta X &= a_1x^2 + b_1xy + c_1y^2 + z_1x + d_1y + f_1t \\ \Delta Y &= a_2x^2 + b_2xy + c_2y^2 + z_2x + d_2y + f_2t \end{aligned}$$

表示为矩阵形式:

$$X = AY$$

对于第一个线性方程组有:

$$\begin{aligned} X &= [\Delta X_1 \quad \Delta X_2 \quad \Delta X_3 \quad \dots \quad \Delta X_n]^T \\ A &= \begin{bmatrix} X_1^2 & X_1Y_1 & Y_1^2 & X_1 & Y_1 & t \\ X_2^2 & X_2Y_2 & Y_2^2 & X_2 & Y_2 & t \\ X_3^2 & X_3Y_3 & Y_3^2 & X_3 & Y_3 & t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & X_nY_n & Y_n^2 & X_n & Y_n & t \end{bmatrix} \\ Y &= [a_1 \quad b_1 \quad c_1 \quad z_1 \quad d_1 \quad f_1]^T \end{aligned}$$

对于第二个线性方程组有:

$$\begin{aligned} X &= [\Delta Y_1 \quad \Delta Y_2 \quad \Delta Y_3 \quad \dots \quad \Delta Y_n]^T \\ A &= \begin{bmatrix} X_1^2 & X_1Y_1 & Y_1^2 & X_1 & Y_1 & t \\ X_2^2 & X_2Y_2 & Y_2^2 & X_2 & Y_2 & t \\ X_3^2 & X_3Y_3 & Y_3^2 & X_3 & Y_3 & t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & X_nY_n & Y_n^2 & X_n & Y_n & t \end{bmatrix} \\ Y &= [a_2 \quad b_2 \quad c_2 \quad z_2 \quad d_2 \quad f_2]^T \end{aligned}$$

参数的解算过程为:

$$\begin{aligned} X &= AY \rightarrow A^T X = A^T A Y \rightarrow (A^T A)^{-1} A^T X = \\ &= (A^T A)^{-1} A^T A Y \rightarrow Y = (A^T A)^{-1} A^T X \end{aligned}$$

4.2 监测区预报结果

将各个观测点的数据代入上式求得各未知参数结果(表 4)。

表 4 各未知参数的解算结果

Table 4 Calculation result of each uncertain factor

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>z</i>	<i>d</i>	<i>f</i>
1	- 0.001 427 624	0.003 426 870 6	0.001 172 489 0	- 0.508 963 62	- 6.805 955	- 1.742 893 6
2	0.000 447 125	0.006 119 034 6	0.006 051 707	- 0.642 679 97	- 14.543 686	40.075 329

将原始数据和时间参数带入线性方程即可求得各点(包括非监测点)在设定时间内的位移量。考虑到 XG06 和 XG08 点的变化受到多种外界因素的影响,不宜用此模型预测,因此用其余 8 个点(除去 XG06 和 XG08 点)作 4 a 位移预测,求得结果如表 5。

可以看出,所得结果与表 1 的数据极为接近,说

明此模型曲面拟合较好,适合作滑坡预报模型。由此,可利用此模型对滑坡作 10 a 的位移预测,求得结果如表 6。

为了更直观地反映 10 a 后滑坡体的运动趋势,根据预测所的数据,制作 10 a 水平位移矢量图(图 6)。

表 5 模型预测 4 a 平面位移结果(mm)
Table 5 Forecast of 4 years' plan displacement by model(mm)

点名	x 方向位移	y 方向位移	累计位移
XG20	3. 383 459 576 451 46	- 22. 332 104 509 176 4	22. 586 958 416 623
XG09	56. 250 241 576 877 3	- 35. 785 527 190 996 9	66. 668 535 560 597 3
XG16	13. 644 658 121 126 6	- 25. 012 673 488 166 7	28. 492 288 961 543
XG04	59. 263 297 660 467 8	- 83. 714 496 868 592 8	102. 568 296 444 637
XG11	27. 593 043 988 480 1	- 60. 123 586 736 309 6	66. 153 017 758 744 4
XG19	- 26. 612 960 408 039 4	- 15. 870 374 571 818 6	30. 985 778 201 131 2
XG21	1. 442 785 669 342 64	- 9. 768 894 859 761 82	9. 874 863 911 403 6
XG23	23. 035 602 239 340 6	- 32. 392 070 079 741 7	39. 747 769 428 988 2

表 6 由模型所得的 10 a 水平位移预测(mm)
Table 6 Calculation of 10 years' average displacement by model(mm)

点名	x 方向累积位移	y 方向累积位移	累积位移
XG20	- 7. 073 902 532 620 35	218. 119 869 668 759	218. 234 547 314 025
XG09	45. 792 879 467 457 8	204. 666 446 987 781	209. 726 827 879 8
XG16	3. 187 296 012 077 08	215. 439 300 689 741	215. 462 876 471 918
XG04	48. 805 935 550 795 5	156. 737 477 310 82	164. 160 458 511 629
XG11	17. 135 681 879 266 4	180. 328 387 441 995	181. 140 715 773 394
XG19	- 37. 070 322 517 125 8	224. 581 599 606 117	227. 620 525 641 177
XG21	- 9. 014 576 439 887 65	230. 683 079 318 521	230. 859 146 823 914
XG23	12. 578 240 130 125 7	208. 059 904 098 537	208. 439 765 443 793



图 6 10 a 滑坡体水平位移趋势图

Fig. 6 Skeeth map of 10 years' coast level displacem ent

根据预测结果可以看出,在 10 a 内各点的位移变化不大。变形最大的点由原来的 4 号点变为 21 号点,而且各点位移比较接近,整个滑坡体的运动方向也由原来的西北方向转变为正北方向,这说明滑坡的运动趋于整体化,滑坡蠕动变缓,危害性相对减少。各点位移均在 20 cm 左右,在正常情况不会发生险情。但如遇暴雨,山洪等特殊情况应当另外加强监测,以免出现险情。

5 结论

向阳技校滑坡目前正以每年平均 20 mm 的速度向西北方向滑动, 监测结果显示该滑坡的滑床倾角较小, 不易引起滑坡体的高速度运动; 由于滑床倾角较小和围墙的阻挡作用, 目前尚未出现险情。但应结合建筑变形情况及时采取保护措施。

通过示例分析, 说明所提出的滑坡位移预报模型是科学的, 它可预测未来任何时间滑坡体的变形情况, 从而达到对滑坡体水平位移趋势预报的目的, 并及时采取相应的防范措施, 起到了预警的作用。对其他类似的监测工作具有重要参考价值。

参考文献(References):

- [1] Surveying Gauge on Architecture Distortion Cathay Construction Industry Publishing[S]. JGJ/ 8- 97: 65~ 68. [建筑变形测量规程. 北京: 中国建筑工业出版社[S]. JGJ/ 8- 97: 65~ 68.]
- [2] Luan Yuanzhong, Han Litao. Distortion surveying and analysis by GPS in diggings[J]. *Mapping Engineering*, 2001, **11**(2): 17~ 21.

- [栾元重, 韩李涛. 矿区 GPS 变形监测与变形分析[J]. 测绘工程, 2001, **11**(2): 17~ 21.]
- [3] Xu Shaoquan, Cheng Wenming. Research on Three-gorge Coast Surveying by GPS[J]. *Water Conservancy Transaction*, 2003, **1**(1): 155~ 159. [徐绍铨, 程温鸣. GPS 用于三峡库区滑坡监测的研究[J]. 水利学报, 2003, **1**(1): 155~ 159.]
- [4] Tian Yugang, Wang Xinzhou. Precision research of GPS distortion surveying system with more antennas in prophase trial[J]. *Engineering Reconnaissance*, 2002, **11**(6): 81~ 86. [田玉刚, 王新洲. GPS 一机多天线变形监测系统前期试验网的精度研究[J]. 工程勘察, 2002, **11**(6): 81~ 86.]
- [5] Sun Huanjin, Zhang Yongbo. Status and development trend of coast forecast and prediction [J]. *Taiyuan Science University Transaction*, 2001, **11**(6): 635~ 639. [孙怀军, 张永波. 滑坡预测预报的现状和发展趋势[J]. 太原理工大学学报, 2001, **11**(6): 635~ 639.]
- [6] Xu Jiamo. Concerning coast prediction Issue[J]. *Engineering Geology Transaction*, 1998, **6**(4): 319~ 325. [徐嘉谟. 关于滑坡预报问题[J]. 工程地质学报, 1998, **6**(4): 319~ 325.]
- [7] Li Tianbin, Chen Mingdong. A Few Issue on Coast Forecast[J]. *Engineering Geology Transaction*, 1999, **7**(3): 200~ 206. [李天斌, 陈明东. 滑坡预报的几个问题[J]. 工程地质学报, 1999, **7**(3): 200~ 206.]

Application of GPS Technic in Landslide Survey

LI Tianwen¹, WU Lin¹, LI Jiaquan²

(1. Urban and Resource Department, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Geo-Survey Academy, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Probing into principle and method of applying GPS Technic into Coast Surveying, combining with surveying data about XiangYang Technical School to reason this method, and through synthetical analysis of a few years observation data, this papen determined size and direction of landslide displacement and the influence of building on slide surface, and put forward a forecasting model. This research is of significance to prevent disaster and provide vital reference of applying GPS into distortion surveying.

Key words: landslide; GPS; distortion surveying; datum mark