

单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究*

陈永奇 James Lutes

(香港理工大学土地测量和地理资讯学系,香港九龙红磡)

摘要 讨论了变形监测中 GPS 单历元观测数据处理方法,重点是模糊度搜索空间的构成和搜索,最优解的获得和检验以及利用相位和伪距观测量提取多路径的影响。分析了所提方法的测试结果和处理快速变形所能达到的精度。

关键词 变形监测; GPS; 单历元; 数据处理

分类号 P228. 4

GPS 测量技术已广泛用于各类变形监测。根据其监测对象的特点,有 3 种不同作业和监测模式^[4]: 周期性重复测量、固定连续 GPS 测站阵列和实时动态监测。第一种是最常用的,每一个周期测量测点之间的相对位置(类似于控制测量),通过计算两个观测周期之间相对位置的变化来测定变形,数据处理方式是静态相对定位。第二种方式是在一些重点和关键地区(如地震活跃区、滑坡危险地段)或敏感工程建筑物(如大坝)布设永久 GPS 观测站,在这些测站上连续观测,数据传输到数据处理中心处理。这种监测方式最早由 Ladd 建议^[8],后来用到许多工程中,例如测量大坝变形^[7],研究地壳运动^[3],监测滑坡的稳定性^[12]。由于研究的是缓慢的变形,因此在数据处理时,几分钟甚至几十分钟的观测数据可作为一组,用静态相对定位方式处理。第三种主要是实时监测工程建筑物的动态变形,如大桥在荷载作用下的快速变形^[2, 9, 10]。这种测量的特点是采样密度高,例如每秒钟采样一次,而且要计算每个历元的位置。目前数据处理主要采用 OTF 处理方式。观测开始后有几分钟的初始化过程,即用几分钟观测数据解算整周模糊度,然后用已求得的整周模糊度计算每一历元接收机的位置。在工程测量中,特别是动态监测工程建筑物,由于工作环境限制, GPS 信号经常中断,这给用 OTF 处理带来困难。而且,现有商品化软件原都不是为此类变形监测设计的,缺乏必要的质量控制。因此,有必要探讨一套专门用于变形监测的 GPS 数据处理方法和相应的软件。

作者在 1996 年研制了 GPS 变形监测数据处

理软件 GPSMON^[11],它是基于双频单历元观测,充分利用到变形监测时目标点在一定范围内变化的特点,使数据处理不受连续跟踪中断的影响,同时加入了质量控制措施,例如多路径影响指数、整周模糊度解算有效性检验等。该软件经过近一年的测试和完善,现可用于实际工程中。本文主要讨论单历元数据处理方法、质量控制及试验的结果。

1 单历元 GPS 观测数据处理方法

1.1 数据处理框图

利用单历元 GPS 相位观测量进行精密定位主要解决整周模糊度的有效解算、检验以及多路径影响显著性的检查。图 1 是数据处理框图。RINEX 转译器将不同型号接收机的数据转换成一种统一的数据格式。分析与绘图模块主要是分析和显示变形与时间的关系、多路径影响的时间特性。以下重点介绍几个主要模块的工作原理。

1.2 模糊度搜索空间的构成

首先选择 4 颗观测卫星构成搜索空间,这 4 颗卫星必须满足以下条件:

- 1) 高度角大于 15° ;
- 2) 在参考站和待定测站上都有其 L_1 相位观测值;
- 3) 由它们构成的 PDOP 最小, PDOP 定义为:

$$PDOP = \text{trace} (A^T A)^{-1}$$

其中 A 为站—星之间相位双差所对应的设计矩阵。构成双差时,选择一颗高度角大且两测站均有其 L_2 相位观测量的卫星作为参考卫星。然后,用

收稿日期: 1998-03-16. 陈永奇,男,54岁,教授,博士生导师,现从事 GPS 的应用和变形观测数据处理等研究

* 香港研究基金会资助项目,编号 Poly U A/C 354/015

卫星和参考测站的坐标以及待定站的初始坐标计算3个距离双差:

$$d_{ij}^l = \| r^l - r_j \| - \| r^k - r_j \| - \| r^l - r_i \| + \| r^k - r_i \| \quad (1)$$

式中, r 为卫星(带上标)和测站(带下标)的位置矢量; i 为参考测站; k 为参考卫星。利用 L_1 相位观测双差 H_{ij}^l 可计算整周模糊度双差:

$$N_{ij}^{kl} = WF \cdot \text{int}[(d_{ij}^l - \lambda_1 H_{ij}^l) \lambda_1] \quad (2)$$

其中 $\text{int}(\cdot)$ 表示凑整, WF 为波长系数(整周相位观测取1, 平方型信号相位观测取2)。为构成模

糊度搜索空间, 上式所计算的3个模糊度双差允许其变化 $\pm n$ 周(用户可选择 n 值)

选择 n 时要平衡搜索时间和搜索范围。 n 选得越大, 待定站的初始坐标精度就可以越低。根据变形观测的特点, n 可取3, 这相当于初始坐标精度约0.4 m(模拟计算数据)。为了使软件和方法能用于较大的变形, 例如长悬拉桥的上下摆动, 滑坡在后期快速滑动, 软件可取用前一历元的结果作为下一个历元的初始值, 如图1所示。

有了3个模糊度的可能组合(共有 $(2n+1)^3$)

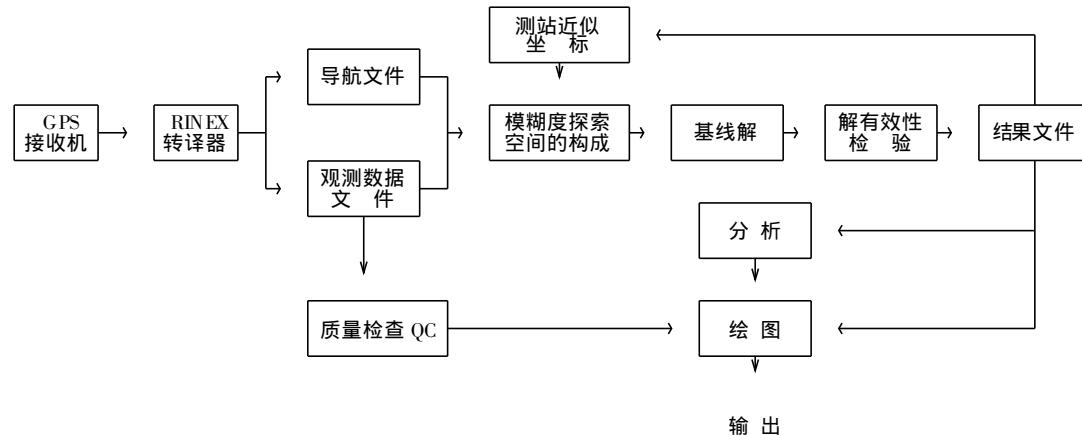


图1 单历元GPS观测数据处理框图

Fig. 1 Diagram of Single Epoch GPS Observation Data Processing

个组合), 可以由下式解算待定点的可能位置 r_j :

$$\lambda_1 H_{ij}^l - \lambda_1 N_{ij}^{kl} / (WF) + \| r^l - r_i \| - \| r^k - r_i \| = \| r^l - r_j \| - \| r^k - r_j \| \quad (3)$$

1.3 待定点位置的最优解和解的检验

由上述方法获得 $(2n+1)^3$ 个待定点可能的位置矢量 r_j , 利用式(1)和式(2)计算同一历元 L_1 和 L_2 相位观测整周模糊度双差, 共有 $(2n+1)^3$ 组。对于每一组, 列出相位观测双差“固定解”的观测方程, 用最小二乘原理解待定点的坐标和估算后验方差因子或残差二次型。在 $(2n+1)^3$ 组解算结果中, 选择具有最小残差二次型的解为最优解。

最优解还需进行检验, 主要是通过比较“最优”解和“次最优”解的残差二次型(次最优解是指相应的残差二次型为次最小的)。国际上检验最优解有效性的方法都存在着不同程度的缺陷。最近作者提出了一种理论上严密的、基于模型可分离度的检验方法^[1, 5, 6]。

设 Z_m 和 Z_s 为两整周模糊度向量, 它们分别相应于最优解和次最优解, 其残差二次型分别为 K_m 和 K_s 。令 Q_Z 为模糊度双差向量“浮动解”的协因数阵, 则中心参数为:

$$W = (Z_s - Z_m)^T Q_Z^{-1} (Z_s - Z_m) \quad (4)$$

新的检验方法为: 给定可以接受的犯第一类和第二类错误的概率分别为 T_0 和 U_0 , 由 T_0 U_0 和 W 可计算边界值 A 和 B (见图2)。如果以下的

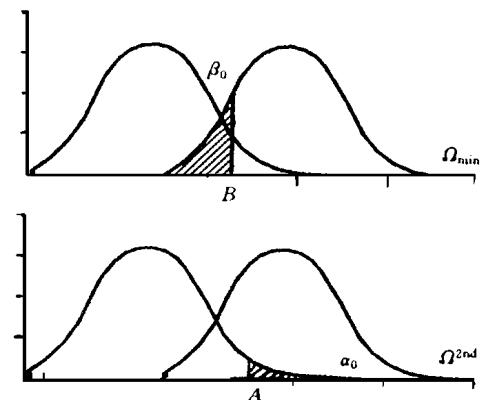


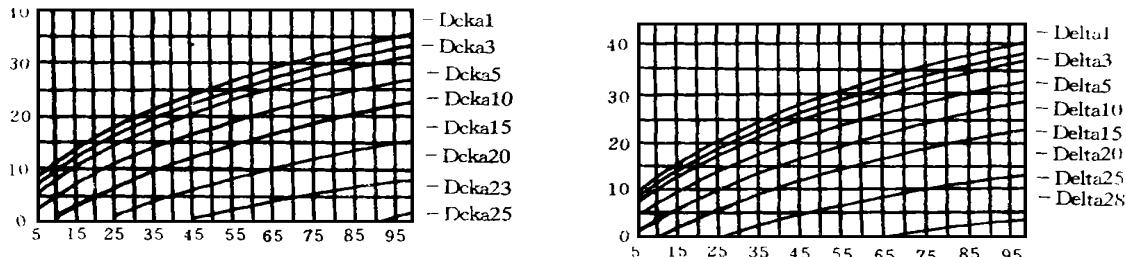
图2 残差二次型的 i^2 分布

Fig. 2 Distribution of Residual Quadratic Form i^2

条件满足, 则相应于最小残差二次型的固定解 Z_m 是有效的, 否则不能确定 Z_m 还是 Z_s 是正确的:

$$K_m < B, K_s > A \quad (5)$$

式中, $A = x^2(df; T_0)$ 由概率分布表中查出, 而 B 是非中心 i^2 的分布的分位值, 为方便查取, 图3 绘出了 $(A - B)$ 值, 图3(a)中, $T_0 = 0.05$, $U_0 =$

图 3 差值 ($A - B$)Fig. 3 Difference Value ($A - B$)

0.20;图 3 (b) 中, $T_0 = 0.05$, $U_0 = 0.10$

1.4 多路径影响的检查

变形观测中,特别是工程建筑物的变形观测,由于测点周围环境的影响,多路径影响往往比较显著,成为影响 GPS 测量精度的主要因素之一。检查多路径影响的大小是质量检查的重要一环。虽然相位多路径影响难于估计,但通过计算伪距多路径的影响可以对测站附近的信号反射情况及定位结果的精度有一个了解。该软件利用双频相位观测和伪距观测提取伪距多路径影响分量,具体公式推导参阅作者的研究报告^[11]。设 H_1 和 H_2 分别为 L_1 和 L_2 相位观测值, P_1 , P_2 为其伪距观测值,则多路径对伪距 P_i ($i = 1, 2$) 的影响为:

$$MP_1 = P_1 - [1 + 2/(T-1)]H_1 + [2/(T-1)]H_2 + B_1 + M^P_1 \quad (6a)$$

$$MP_2 = P_2 - [2T/(T-1)]H_1 + [2T/(T-1) - 1]H_2 + B_2 + M^P_2 \quad (6b)$$

式中, $T = (f_2/f_1)^2 = 0.61$; B_1 是双频整周模糊度的线性组合,对于连续相位观测,它是一个固定的偏差,在研究多路径影响的时间特性时可以忽略; M^P 为相位多路径影响的组合。由式 (6) 可以看出, MP_i 和 M^P 是不能分开的,但是由于 M^P 比 MP_i 小得多,因此可以略去。对于研究多路径影响随时间变化特性,式 (6) 可变成为:

$$\begin{cases} MP_1 \approx P_1 + 4.13H_1 - 5.13H_2 \\ MP_2 \approx P_2 + 3.13H_1 - 4.13H_2 \end{cases} \quad (7)$$

2 试验结果分析

为测试方法的有效性,分析不同因素对成果的影响,进行了以下的试验研究。数据是用 Leica 双频接收机 System 200 在一条约 350 m 基线上观测所得,采样间隔 10 s。基线两个测站设在楼顶上。为检查信号多路径的影响,测量分别在相继两天的同一时间段进行。

2.1 方法可靠性测试

所采集的数据分别用两套商品化软件 SKI 和 Geotracer 处理。基于本文方法所研制的软件 GPSMON 是以每一历元为单元处理基线观测值,然后取其平均值作为最后结果。表 1 列出 3 套不同软件的处理结果。可以看出, GPSMON 所得两个不同观测时段的结果相差很小,与其它商品化软件的结果也很接近,因此是可靠的。

表 1 不同软件处理的结果 /m

Tab. 1 Results of Different Software Processing

软件	X /m	Y /m	Z /m
第 I	-2 410 294.040	5 395 741.050	2 405 774.534
II	-2 418 294.042	5 385 741.049	2 405 774.531
III	-2 418 294.034	5 385 741.039	2 405 774.527
第 I	-2 410 294.030	5 385 741.027	2 405 774.517
II	-2 418 294.041	5 385 741.046	2 405 774.522
III	-2 418 294.037	5 395 741.043	2 405 774.521

注: 表 I、II、III 分别表示软件 SKI、Geotracer、GPSMON

2.2 多路径影响估计

软件模块“质量检查 QC”从观测数据文件中提取每颗卫星的相位和伪距观测值,估计多路径影响的大小。图 4 表示相应于其中一颗卫星信号的影响,图中把两天内同一时间段的影响画在一起加以比较。图 4 (a)、(b) 分别是对应于同一测站上的 L_1 C/A 码伪距和 L_2 P 码伪距; 图 4 (c)、(d) 对应于另一测站上 L_1 C/A 码伪距和 L_2 P 码伪距。可以看出,相继两天同一时间段的影响有很强的相关性,计算其相关系数分别为 0.90, 0.85, 0.96 和 0.38。相继两天同一时间段中,卫星与测站的相对几何图形几乎完全一致,从而表明多路径的影响有很强的相关性。

2.3 动态(或快速)变形的测定精度

用两天观测数据计算每一个观测历元测站的位置,结果见图 5,其中 (a) 为南北分量, (b) 为东西分量, (c) 为高程分量。取其平均值作为最或是值,利用每个历元结果与最或是值之差计算每

一历元所得结果的标准差,见表 2

可以看出,水平方向上位置测定精度在 5 mm 左右,高程方向精度 14 mm。然而,分析相继两天同一时间段所得测站位置的数据却没有发现明显

的相关性,东西方向、南北方向和高程方向位置分量的相关系数分别为 -0.09、0.38 和 -0.11,因此可以说,单从所得的测站位置系列本身看不出有明显的多路径影响。

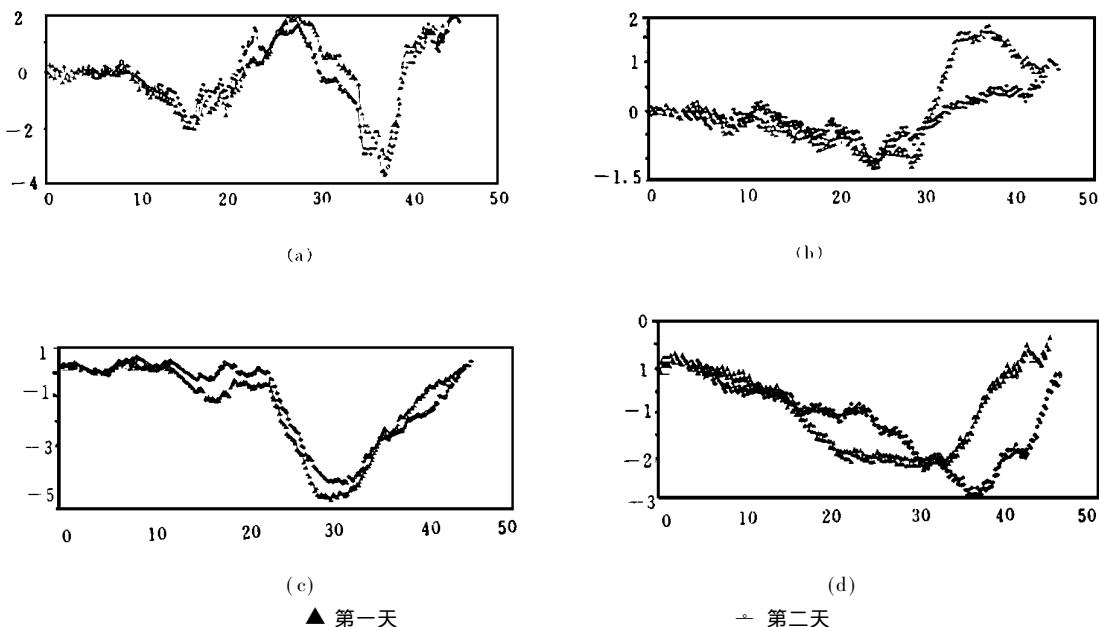
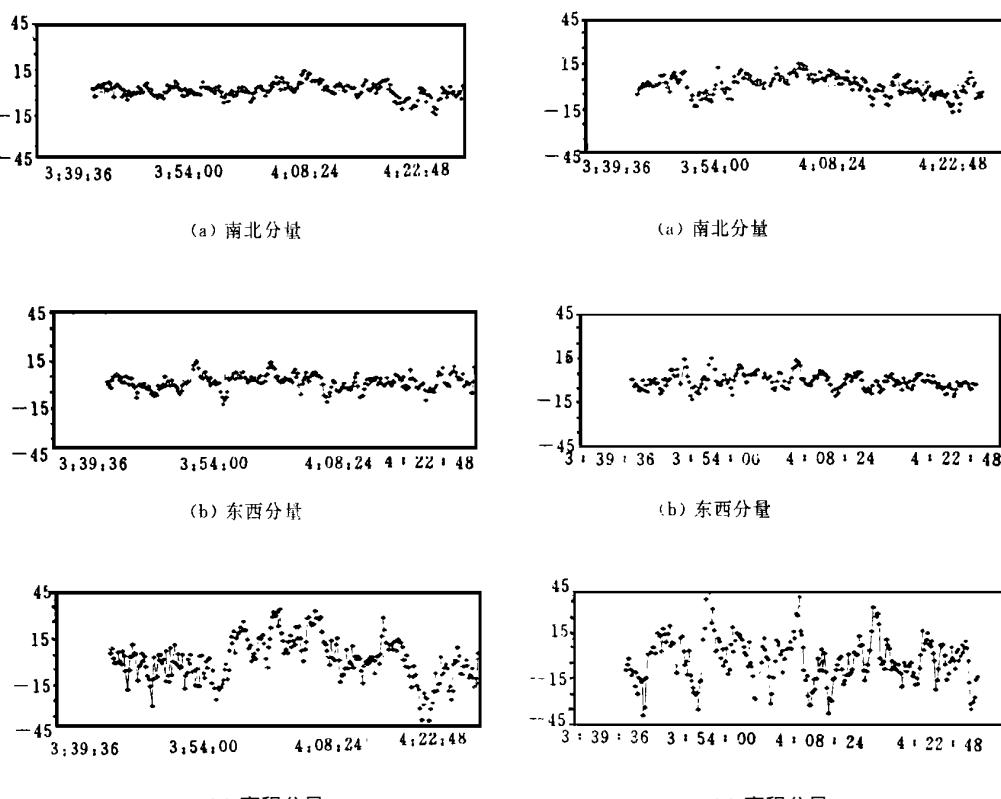


图 4 多路径影响 (对应于卫星 PRN 04)

Fig. 4 Multi-path Effects



第一条基线, 第一天观测

第一条基线, 第二天观测

图 5 每个历元测站坐标的变化

Fig. 5 Change of Every Epoch Observation Station

表 2 每一历元观测结果的精度 /mm

Tab. 2 Precision of Every Epoch's Observation Results

	e_N	e_E	e_H
第一天	4.5	4.8	13.7
第二天	6.5	4.9	14.4

为了进一步检验多路径效应对定位结果精度的影响,做了另一次试验。同样的接收机在另一条基线上进行 GPS 测量用,采样间隔为 2 s, QC 检验结果没有发现明显的多路径影响。然后,计算每一历元测站位置,如图 6 所示。类似上述方法,计算坐标分量的标准差为 $e_N = 2.6 \text{ mm}$, $e_E = 2.4 \text{ mm}$, $e_H = 6.8 \text{ mm}$, 与表 2 比较,精度提高了一倍。因此可以说多路径的影响降低了变形测量的精度。在没有明显多路径影响的条件下,单历元位置确定精度为: 水平方向为 8 mm, 高程方向为亚厘米。

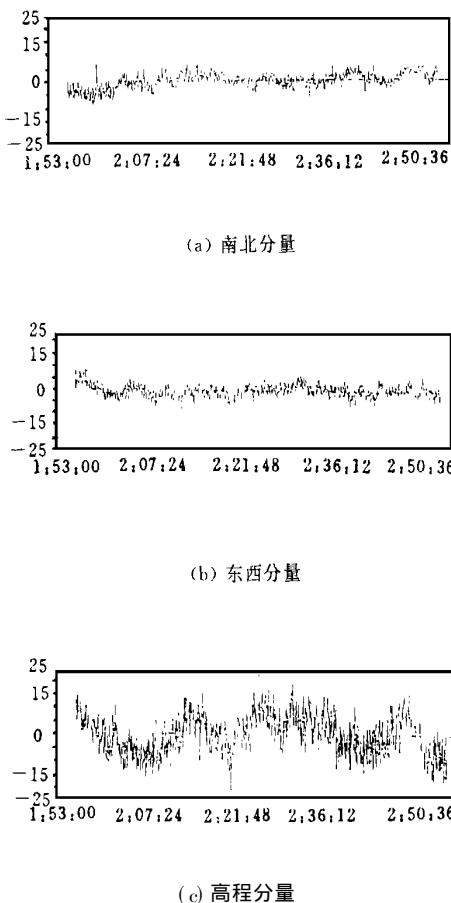


图 6 每个历元测站坐标变化 (第二条基线)

Fig. 6 Coordinate Change of Every Epoch

Observation Station

厘米。这也说明了该软件由于加入 QC 模块,可以间接地预计变形观测所能达到的精度。

3 结 论

现有商品化 GPS 数据处理软件不能处理不同形式的变形观测,也缺乏必要的质量控制,因此需要研究新的处理方法。GPMON 是专为变形观测设计的,它针对变形观测的特点,以单一历元观测数据为基础确定测站的位置,因此能用于缓慢或快速变形的监测。测试结果表明,本文所提的方法是有效的和可靠的,采用的快速模糊度搜索的策略,保证了软件能及时提供结果,可用于实时动态快速变形监测。方法中包含的解算模糊度检验模块和 QC 模块是必要的,它们能更好地控制和检验所得结果的质量。

参 考 文 献

- 1 陈永奇. 一种检验 GPS 整周模糊度解算有效性的方法. 武汉测绘科技大学学报, 1997 (4): 343~ 345
- 2 Ashkenazi V, Dodson A H, Moore T, Roberts G W. Real Time OTF GPS Monitoring of the Humber Bridge. Survey World, 1996, 4(4)
- 3 Bock Y Q. Continuous Monitoring of Crustal Deformations. GPS World, 1991, 2(6): 40~ 47
- 4 Chen Y. Deformation Monitoring and Analysis—Modern Trend and Developments. In: Proceedings of the 64th FIG PC Meeting and International Symposium. Singapore, 1997. 84~ 100
- 5 Chen Y. An Approach to Validate the Resolved Ambiguities in GPS Rapid Positioning. In: Proceedings of KIS' 97, Banff, Canada, 1997. 301~ 304
- 6 Chen Y, Chrzanowski A. An Approach to Separability of Deformation Models. ZfV, 1994 (2): 96~ 103
- 7 Deloach S. Continuous Deformation Monitoring with GPS. Journal of Surveying Engineering, 1989, 115 (1): 93~ 110
- 8 Ladd J. Continuous Monitoring of Deformation with GPS. In: Proceedings of Deformation Measurement Workshop. MIT, USA, 1986. 416~ 436
- 9 Leach M P, Hyzak M D. GPS Structural Monitoring as Applied to a Cable-Stayed Suspension Bridge. In: Proceedings of FIG 20 Congress, 1994 (b). Paper TS 606. 2
- 10 Leroy E. GPS Real Time Leveling on the World Longest Suspension Bridge. GIM, 1996.
- 11 Lutes J. Development of Methodology for Rapid and Precise GPS Positioning.

(下转第 363 页)

A Matrix for Describing Topological Relationships Between 3D Spatial Features

Chen Jun Guo Wei

(National Geomatics Center of China, 1 Baisheng Cun, Zizhuyuang, Beijing, China, 100044)

Abstract Formal description and representation of topological relationships between 3D spatial features is one of the key issues in developing 3D GIS. An approach was proposed in this paper to describe the topological relationships between 3D spatial features with their k -simplex components ($0 \leq k \leq 3$). The topological relationships for the pair of k -simplex were examined with dimension-extend 9-intersection. Six types of primitive relations were used, such as touch, cross, in, disjoint, overlap and equal. The topological relationships between 3D spatial features were described with a topological matrix T which compared the relationships between any two k -simplex of the two 3D spatial features.

Key words 3D spatial features; k -simplex; topological relationships; formal description; space partition; topological relationship matrix

(上接第 328 页)

Internal Technical Report, Dept. of LSGI, the Hong Kong Polytechnic University, 1996.

12 Shimizu N, Mizuta Y, Kondo H, Ono H. A New GPS Real Time Monitoring System for Deformation

System for Deformation Measurements and its Application. In Proceedings of the 8th Int. Symp. on Deformation Measurements, Hong Kong, 1996. 47 ~ 54

Development of the Methodology for Single Epoch GPS Deformation Monitoring

Chen Yongqi James Lutes

(Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract This paper discusses the methodology to process single epoch GPS observations for deformation surveys. It takes full advantage of the characteristics of deformation surveys, i.e., the position of a surveyed point changes relatively small between two consecutive survey epochs. Special attention is given to efficient solution of carrier ambiguities and multi-path effects. The tests indicate the methodology works well and an accuracy of a few millimeters is achievable. The developed method can be used to process the GPS data from both slow deformation and rapid /dynamic deformation monitoring.

Key words deformation monitoring; GPS; single epoch; methodology