

多传感器数据融合技术在自控垂钻检测系统中的应用

龚元明, 萧德云, 王俊杰

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 多传感器数据融合技术是近几年发展起来的一门新兴技术, 在军事和工业中有着广阔的应用前景. 本文论述了多传感器数据融合的基本工作原理和过程; 针对自控垂钻检测系统的特点和要求, 提出了基于多传感器系统的顶角和方位角检测方案; 给出了基于多传感器算术平均值与递推估计, 多传感器算术平均值与分批估计二种数据融合计算方法, 可有效地提高自控垂钻检测系统抗干扰能力, 以保证参数检测的可靠性和准确性.

关键词: 传感器; 数据融合; 多传感器融合; 智能检测系统.

中图分类号: O236; P634.9 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)05-0524-05

作者简介: 龚元明(1964—), 副教授, 男, 1999年毕业于中国地质大学, 获博士学位, 现在清华大学自动化系博士后流动站工作, 主要从事检测、自动控制和仪器仪表方面的科研与开发工作.

自动垂钻系统是国家重大科学工程项目“中国大陆科学钻探工程”实施中将采用的重要钻进器具之一, 而钻孔轨迹的检测是该系统中的一个重要环节. 在地下数千米, 由于钻具工作环境的复杂性和难以预见性, 如何解决自动垂钻系统中钻孔轨迹顶角和方位角参数检测, 保证和提高检测数据的可信度, 是该系统的关键技术之一. 根据国内外研究应用表明, 采用多传感器数据融合技术能有效地消除检测中的不确定因素, 提高检测结果的准确性, 是现代智能检测信息处理的一种新的方法. 数据融合用于智能检测系统, 无疑将有助于改善检测系统的性能, 使智能检测系统具有专家系统的特征.

1 多传感器数据融合基本原理和融合过程

1.1 数据融合的定义

数据融合^[1](data fusion)一词出现在20世纪70年代, 并于20世纪80年代发展成一门专门技术, 它是人类模仿自身信息处理能力的结果. 数据融合最早用于军事, 早在1973年, 美国研究机构就在国防部的资助下, 开展了声纳信号解释系统的研究.

自从海湾战争, 特别是科索沃战争以来, 致力于数据融合研究的人数和这一领域论著的数量显著增加, 大大推动了数据融合技术的发展. 目前, 在C³I(command, control, communication and intelligence)系统中都在采用多传感器融合技术, 在工业控制、机器人、空中交通管制、海洋监视和管理等领域也朝着多传感器融合方向发展. 多传感器融合技术成为军事、工业和高技术开发等多方面关心的问题.

根据国内外的研究成果, 多传感器数据融合比较确切的定义可概括为: 充分利用不同时间与空间的多传感器数据资源, 采用计算机技术对按时间序列获得的多传感器观测数据, 在一定准则下进行分析、综合、支配和使用, 获得对被测对象的一致性解释与描述, 进而实现相应的决策和估计, 使系统获得比它的各组成部分更充分的信息.

因此, 多传感器是数据融合的基础, 多源信息是数据融合的加工对象, 协调优化和综合处理是数据融合的核心.

1.2 数据融合的基本原理

多传感器数据融合是人类和其他生物系统中普遍存在的一种基本功能, 人类本能地具有将身体上的各种功能器官(眼、耳、鼻、四肢)所探测(景物、声音、气味和触觉)的现象与先验知识进行综合的能力, 以便对他周围的环境和正在发生的事情做出估

计,由于人类的感官具有不同度量特征,因而可测出不同空间范围内发生的各种物理现象.

多传感器数据融合实际上是对人脑综合处理复杂问题的一种功能模拟,其基本原理^[2]就是充分利用多传感器资源,通过对这些传感器及观测信息的合理支配和使用,将各种传感器在空间或时间上的冗余或互补信息依据某种准则进行组合起来,产生对被测对象的一致性解释或描述.其目的是基于各传感器分离的观测信息,通过对信息的优化组合导出更多的有用信息;它的最终目标是利用多传感器共同或联合的操作优势,来提高整个传感器系统的有效性,消除单个或少量传感器的局限性.因此,多传感器系统比由它的各组成部分的子集所构成的系统更有优越性.

在多传感器数据融合系统中,各种传感器的数据可以具有不同的特征,可能是实时的或非实时的、模糊的或确定的、互相支持的或互补的,也可能是互相矛盾或竞争的.它与单传感器数据处理或低层次的多传感器数据处理方式相比,更能有效地利用多传感器资源.

单传感器数据处理或低层次的多传感器数据处理都是对人脑信息处理的一种低水平模仿,而多传感器数据融合系统则是通过有效地利用多传感器资源,来最大限度地获得被测目标和环境的信息.多传感器数据融合与经典的信号处理方法也存在本质的区别,其关键在于信息融合所处理的多传感器信息具有更复杂的形式,而且通常在不同的信息层次上出现.

另外,多传感器数据融合系统所处理的数据具有更复杂的形式,而且可以在不同的信息层次上出现,包括数据层(像素层)、特征层和决策层(证据层).

1.3 数据融合过程

多传感器微机检测系统数据融合过程^[3]如图 1 所示.

由于被测对象多半为具有不同特征的非电量,

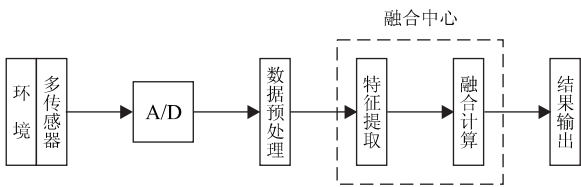


图 1 多传感器数据融合过程

Fig. 1 Multi-sensor data fusion process

如钻进过程中的钻孔顶角和钻孔方位角等,所以首先要将它们转换为电信号,然后经过 A/D 变换将它们转换为能由计算机处理的数字量.数字化后的电信号需经预处理,以滤除数据采集过程中的干扰和噪声,经处理后的有用信号还要作特征抽取,根据所抽取的特征信号,进行数据融合,最后输出结果.

(1)信号的获取.多传感器信号获取的方法很多,可根据具体情况采取不同的传感器获取被测对象的信号.图形景物信息的获取一般可利用电视摄像系统或电荷耦合器件(CCD),将外界的图形景物信息进入电视摄像系统或电荷耦合器件变化的光通量转换成变化的电信号,再经 A/D 转换后进入计算机系统.工程信号的获取一般采用工程上的专用传感器,将非电量信号或电信号转换成 A/D 转换器或计算机 I/O 口能接收的电信号,进入计算机进行处理.

(2)信号预处理.在信号获取过程中,一方面由于各种客观因素的影响,在检测到的信号中常常混有噪音;另一方面,经过 A/D 转换后的离散时间信号除含有原来的噪音外,又增加了 A/D 转换器的量化噪音.因此,在对多传感器信号融合处理前,有必要对传感器输出信号进行预处理,以尽可能地去掉这些噪音,提高信号的信噪比.在自控垂钻检测系统中,随机干扰因素较多,必须采取有效的信号预处理方法和措施,才能保证检测信号的准确性.常规的信号预处理方法主要有去均值、滤波、消除趋势项、野点剔除等.

(3)特征提取.对来自传感器的原始信息进行特征提取,特征可以是被测对象的各种物理量.在自控垂钻检测系统中,特征提取主要是提取顶角和方位角二个参数数据.

(4)融合计算.数据融合计算方法较多,主要有数据相关技术、估计理论和识别技术等.

2 自控垂钻检测系统工作原理

2.1 工作原理

大陆科学钻探要求钻机垂直钻进,而由于所钻地层的复杂性,钻头和钻杆在钻进过程中伴随着复杂的振动和涡动,使得钻头不可能一直保持垂直钻进而产生钻孔弯曲,因此必须采取有效的措施保持钻头垂直钻进.除了采用一些常规扶正措施外,还必须采取特定的装置——自控垂钻系统,自动地控制钻机垂直钻进.

自控垂钻系统工作原理就是在钻进过程中,通

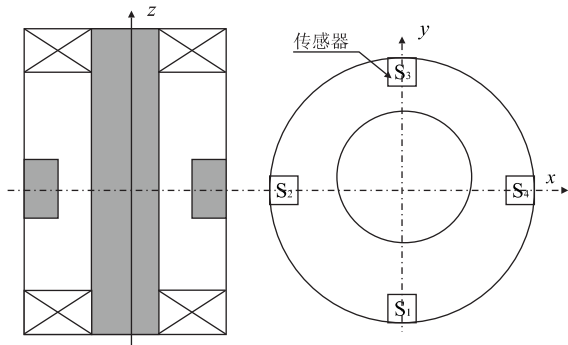


图 2 自控垂钻检测系统工作原理

Fig. 2 Working principle of the automatic vertical drilling detecting system

过传感器实时地随钻检测钻孔的顶角和方位角,计算出钻孔当前的空间轨迹,并对钻孔空间轨迹进行预测,如果钻孔偏离了或即将偏离设计要求,立即启动特定的机械执行机构予以纠偏以保证钻孔垂直。

由于垂钻检测系统工作于地下数 km,工作环境复杂,噪音干扰较大,并且干扰的不确定性大,为了提高测量数据可靠性和测量数据准确性,可以采用多传感器冗余检测技术提高其数据测量的可靠性,采用数据融合技术提高数据测量准确性。具体检测原理如下:

在岩心管上端设置一定长度的单动的导向钻具短节,在导向钻具短节中部沿径向分别布置多个(如 4 个)同类型三轴的重力加速度传感器 S_1, S_2, S_3 和 S_4 ,分别检测各自的 X, Y, Z 方向受力的大小,通过力的合成和分解计算出弯曲轨迹,即求出钻孔的顶角和相对方位角,通过相应的执行机构来控制钻具垂直钻进。具体检测工作原理如图 2 所示。

顶角 θ 为 Z 轴方向力 F_Z 的函数,即 $\theta = f(F_Z)$ 。相对方位角为 X 轴和 Y 轴方向的合力 F_{XY} 的函数 $\varphi = f(F_{XY})$ 。

2.2 系统硬件组成

自控垂钻检测系统硬件组成如图 3 所示。将 4

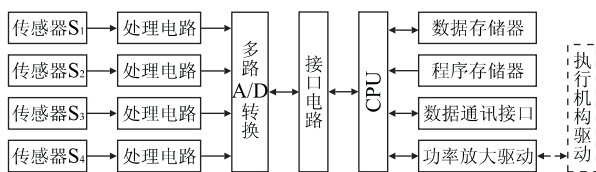


图 3 自控垂钻检测系统硬件组成原理

Fig. 3 Composing principle of automatic vertical drilling detecting system

个传感器输出信号通过处理电路,经 A/D 转换转换为数字信号,送入单片机系统进行多传感器信号的预处理,剔除野点,获得一致性测量结果,再进行数据融合。在该系统中,计算机检测系统应选择数据处理能力强的 16 位单片机系统和 10 位 A/D 以及高度集成的数据检测处理电路,保证系统硬件工作正常,有条件开发专用计算机检测系统更好。整个硬件系统安装入导向钻具短节环状空间中,采用利用冲洗液带动孔底发电机发电供电。

3 自控垂钻检测系统的数据融合方法

目前,多传感器数据融合的理论方法^[4]主要有:判断或检测理论,估计理论和数据关联等。其目的是依据有限的传感器资源,消除测量中的不确定因素,获得更准确、更可靠的测量结果。由于采用了数据融合处理,当系统中的某些传感器失效时,系统可以依据其他非失效传感器提供的信息,通过数据融合获知准确的测量值。

3.1 基于多传感器算术平均值与递推估计的数据融合方法

基于多传感器算术平均值与递推估计的数据融合方法,具有计算量小,计算机编程容易等优点,适用于缓变量智能检测系统^[2]。根据自控垂钻系统的特点和局限性,采用该方法是合适的。

具体融合过程是:对安装在导向钻具短节内的典型位置的 4 个三轴重力加速度传感器检测得到的测量数据列,进行坐标变换变为统一的坐标系中,分别计算出钻具的顶角和相对方位角,然后计算出同一时间 4 个传感器检测数据的算术平均值,获得可靠的初始估计结果;然后进行递推估计计算,获得比算术平均值更可靠的测量结果。

具体算法如下(以顶角计算为例):

设 $\theta_{ij}, \varphi_{ij}$ 分别为第 i 个传感器第 j 次测量经进行统一坐标变换后的顶角和方位角值,剔除了疏误差的 n 个传感器 N 次测量一致性测量数据的平均值列分别为: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N; \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$, 其中:

$$\varphi_N = (\varphi_{1N} + \varphi_{2N} + \varphi_{3N} + \varphi_{4N}) / 4,$$

$$\theta_N = (\theta_{1N} + \theta_{2N} + \theta_{3N} + \theta_{4N}) / 4.$$

则一致性采样数据的算术平均值为

$$\bar{\theta}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i.$$

获得 $\bar{\theta}_N$ 后,可以将 $\bar{\theta}_N$ 作为已有的检测结果并替换

$\hat{\theta}^-$. 在后续测量中,可根据检测系统的误差要求 α 对传感器后续采样值 $\theta_k (K=N+1, N+2, \dots)$ 进行一致性检验,当

$$|\theta_k - \hat{\theta}^-| \leq \alpha$$

时,认定 θ_k 为一致性测量数据,计算 $\hat{\theta}^-$ 与 θ_k 的递推估计值即为新的检测结果 $\hat{\theta}^+$,然后将 $\hat{\theta}^+$ 作为下一次传感器采样一致性检验和递推估计的已有数据 $\hat{\theta}^-$. 否则,剔除 θ_k ,保存 $\hat{\theta}^-$.

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}^- \\ \theta_k \end{pmatrix} = \mathbf{H}\theta^+ \begin{pmatrix} v_- \\ v_k \end{pmatrix}$$

式中, θ 为被估计的随机变量, v_- 和 v_k 为符合正态分布的测量噪音,系数矩阵 \mathbf{H} 为: $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, 若 $\hat{\theta}^-$, θ_k 的方差分别为 σ_-^2, σ_k^2 , 则测量噪音的协方差为:

$$\mathbf{D} = E(\mathbf{v}, \mathbf{v}^T) \begin{bmatrix} E(v_-^2) & E(v_- v_k) \\ E(v_k v_-) & E(v_k^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_-^2 & 0 \\ 0 & \sigma_k^2 \end{bmatrix}$$

由递推估计理论,可求得实际估计值为:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}^+ &= \hat{\theta}^- + \sigma_-^2 \mathbf{H}^T [\mathbf{H}\sigma_-^2 \mathbf{H}^T + \mathbf{D}]^{-1} [\theta_k - \mathbf{H}\hat{\theta}^-] = \\ & \hat{\theta}^- + \sigma_-^2 [\sigma_-^2 + \sigma_k^2]^{-1} [\theta_k - \hat{\theta}^-] = \\ & \frac{\sigma_k^2}{\sigma_-^2 + \sigma_k^2} \hat{\theta}^- + \frac{\sigma_-^2}{\sigma_-^2 + \sigma_k^2} \theta_k. \end{aligned}$$

估计值 $\hat{\theta}^+$ 的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_+^2 &= \sigma_-^2 - [\sigma_-^2 \mathbf{H}^T] [\mathbf{H}\sigma_-^2 \mathbf{H}^T + \mathbf{D}]^{-1} [\mathbf{H}\sigma_-^2] = \\ & (\sigma_-^2 \sigma_k^2) / (\sigma_-^2 + \sigma_k^2). \end{aligned}$$

按同样的数据融合方法可以计算出相对方位角的实际估计值 $\hat{\varphi}^+$.

3.2 基于多传感器算术平均值与分批估计的数据融合方法

基于多传感器算术平均值与分批估计的数据融合方法是:对安放在系统中的 4 个传感器,按照在空间位置相邻二个传感器不在一组的原则分为 2 组,即传感器 S_1 和 S_3 为一组, S_2 和 S_4 为一组,对两组传感器的测量数据的平均值采用分批估计算法,估计出最接近于真值的融合值.

具体算法如下(以顶角计算为例):

设顶角的两组测量数据的算术平均值分别为 $\bar{\theta}_1 = (\theta_{S_1} + \theta_{S_3})/2$ 和 $\bar{\theta}_2 = (\theta_{S_2} + \theta_{S_4})/2$, 相应的标准差分别为 $\hat{\sigma}_1$ 和 $\hat{\sigma}_2$.

$\bar{\theta}_1$ 和 $\bar{\theta}_2$ 为同一批的 2 个测量数据,在此之前没有任何的顶角测量,即此前的 $\hat{\sigma}^- = \infty$, 则 $(\hat{\sigma}^-)^{-1} = 0$. 根据分批估计理论,分批估计后得到的顶角融合值的方差为:

$$\hat{\sigma}^+ = [(\hat{\sigma}^-)^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} = \hat{\sigma}_1^2 \hat{\sigma}_2^2 / (\hat{\sigma}_1^2 + \hat{\sigma}_2^2).$$

式中, \mathbf{H} 为系数矩阵, $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$; v_1 和 v_2 分别为符合正态分布的 $\bar{\theta}_1$ 和 $\bar{\theta}_2$ 测量噪音, \mathbf{D} 为测量噪音的协方差,

$$\mathbf{D} = E(\mathbf{v}, \mathbf{v}^T) \begin{bmatrix} E(v_1^2) & E(v_1 v_2) \\ E(v_2 v_1) & E(v_2^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 \end{bmatrix}$$

由分批估计可导出顶角的融合值 $\hat{\theta}$ 为:

$$\hat{\theta}^+ = [\hat{\sigma}^+ + \mathbf{H}^T \mathbf{D}^{-1}] \begin{bmatrix} \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_2 \end{bmatrix} = \frac{\hat{\sigma}_2^2}{\hat{\sigma}_1^2 + \hat{\sigma}_2^2} \bar{\theta}_1 + \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_1^2 + \hat{\sigma}_2^2} \bar{\theta}_2.$$

同样,基于同样的数据融合方法可以计算出相对方位角的实际估计值 $\hat{\varphi}^+$.

4 结语

随着科学技术的发展,多传感器数据融合技术方兴未艾,尤其是人工智能技术的进步,新的更有效的数据融合方法将不断推出,并取得广泛的应用.可以预计在不远的将来,多传感器数据融合技术必然成为智能检测系统普遍的一项最基本、最有效的信息处理工具,在检测技术领域获得广泛应用.在钻进过程参数随钻检测领域,特别是“中国大陆科学钻探工程”自控垂钻系统中,不仅需要采用先进的传感器硬件技术,而且还必须运用先进多传感器数据融合技术,才能有效地解决顶角和方位角等参数可靠检测这一关键技术并保证检测精度.

基于算术平均值与估计的数据融合,可以获得可靠的测量值,消除测量中的不确定性,提高测量结果的准确性和重复性,获得更可靠的实时测量结果.通过计算机软件仿真,本文中的二种数据融合方法可以提高检测系统的抗干扰能力和提高检测数据的可靠性.

参考文献:

- [1] 刘同明,夏祖勋,解洪成. 数据融合技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [2] 何友,王国宏,陆大鑫. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000.
- [3] 李圣怡,吴学忠,范大鹏. 多传感器融合理论及在智能制造系统中的应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.
- [4] 腾召胜,罗隆福,童调生. 智能检测系统与数据融合[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

APPLICATION OF MULTISENSOR DATA FUSION TECHNIQUES IN AUTOMATIC VERTICAL DRILLING DETECTING SYSTEM

Gong Yuanming, Xiao Deyun, Wang Junjie

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi-sensor data fusion is a new technique developed in recent years, which is now widely applied to military and civilian areas. This paper discusses basic principles and processes of multi-sensor fusion and puts forward a detecting scheme of dip and azimuth angle of a drilling hole according to the characteristics and demand of the automatic vertical drilling detecting system. Meanwhile, it presents two data fusion methods; one being based on the arithmetic average and expandable estimate for the vertical drilling system and the other, based on the arithmetic average and estimate in batch for the vertical drilling system. These methods can improve the anti-jamming ability of automatic vertical drilling detecting system in order to assure the parameter reliability and veracity of collecting datum.

Key words: sensor; data fusion; multi-sensor fusion; intelligent detecting system.

(上接 512 页)

67 cm. 第 3 类足迹前脚脚印为半圆状,大小 47 cm×52 cm;后脚脚印呈倒锥状,大小 98 cm×82 cm. 此类足迹化石的前后脚足印均为外八字形,即足印轴向与恐龙行走方向外偏 20°左右,因此推测此类恐龙呈外八字形行进. 第 4 类足迹前脚为半圆状、后脚为倒锥状,前脚 64 cm×74 cm;后脚 105 cm×87 cm. 此类足印轴向与恐龙行走方向外偏 30°以上,此类恐龙也为外八字形行进.

在第 1 号化石点,除上述 7 组大型蜥脚类足迹化石外,还有 4 类共 10 组其他的足迹化石. 第 1 类为大角度粗厚三趾型足印化石;第 2 类为小角度纤细、尖锐三趾型足印化石;第 3 类为两趾型足印化石;第 4 类为四足行走三趾外偏型足印化石. 据初步分析对比^[2],第 1 类可能是鸟脚类恐龙足印化石. 第 2、3 类为兽脚类恐龙足印化石. 第 4 类因其行走方式特别,推测可能属蜥蜴类足印化石. 除此之外,还发现有恐龙尾迹,以及 10 cm×10 cm 的圆形凹痕,可能为恐龙的粪化石.

恐龙足迹化石发现于下白垩统河口群中,1 号点的恐龙足迹化石保存在灰色砂岩层的层面上. 岩层面上见有泥裂、浪成波痕、流水波痕等沉积构造.

在 1 号点发掘面之上 1 m 左右的泥质岩中发现有叶肢介和植物碎片化石,砂岩中还发现有鸟类足迹化石. 上述证据表明该区早白垩世为湖相环境,而恐龙足迹化石主要保存在湖滨沙滩或泥滩上.

区域分析表明,白垩纪甘肃兰州—青海民和一带为一内陆淡水湖盆. 在湖盆东南的兰州—永靖一带,白垩纪地层呈角度不整合覆盖于“孤岛状”的奥陶纪地层之上,其中在临近湖盆东南岸,有一系列白垩纪古岛屿分布,当湖平面下降时,这些古岛相连并露出湖面,当湖平面上升时,这些古岛被淹没形成孤岛. 盐锅峡一带的恐龙足迹化石就发现于最近湖中心的“雾宿山古岛”西侧湖岸上. 虽然白垩纪当地气候并不湿润,但湖岸地区草水丰美,是恐龙及其他陆生生物的乐园. 大量的恐龙和其他爬行动物及鸟类在此活动,形成如此丰富多姿的足迹化石.

参考文献:

- [1] 李大庆,杜远生,龚淑云. 甘肃永靖盐锅峡早白垩世恐龙足迹的新发现[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(5): 498.
- [2] 甄朔南,李建军,韩兆宽,等. 中国恐龙足迹研究[M]. 成都:四川科学技术出版社,1996. 1—110.