

文章编号:1001-5078(2023)06-0906-06

· 光电技术与系统 ·

车载式北斗光学三维成像系统技术研究

马元, 张军, 栾兴涛, 张子阳
(北斗应用发展研究院, 北京 100089)

摘要:本文论述了车载式光学成像系统的定位原理,在此基础之上,设计实现车载式北斗光学三维成像系统,该成像系统通过北斗高精度接收机实现成像系统的中心点位置解算,并辅助惯导设备实现成像系统姿态信息解算。通过对比试验,分析说明北斗高精度定位在光学三维成像中发挥的重要价值及成像系统优化方向。北斗定位传感器与光学传感器的有机结合,对提升光学图像信息的有效获取、特定目标的精准感知意义非凡。

关键词:北斗高精度定位;惯性导航;激光测距;多光谱成像;车载式北斗;光学三维;成像系统
中图分类号:TN29;TP274 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.015

Research on automotive BDS optical 3D imaging system technology

MA Yuan, Zhang Jun, LUAN Xing-tao, ZHANG Zi-yang
(BDS Applied Development Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract:This article discusses the positioning principle of a vehicle mounted optical imaging system. Based on this, a vehicle mounted BDS optical 3D imaging system is designed and implemented. The imaging system calculates the center point position of the imaging system through a high-precision BDS receiver, and assists inertial navigation equipment in calculating the attitude information of the imaging system. Through comparative experiments, the important value of BDS high-precision positioning in optical 3D imaging and the optimization direction of imaging systems are analyzed and explained. The organic combination of BDS positioning sensor and optical sensor is of great significance in improving the effective acquisition of optical image information and precise perception of specific targets.

Keywords:BDS high-precision positioning; INS; laser ranging; multispectral imaging; vehicle mounted BDS; optical 3D; imaging system

1 引言

目前通用车载光学成像系统具备车辆周边近距离目标感知功能,可为引导周视镜进行近距离目标处置提供目标信息,实现对车辆周围人员和目标的快速捕获、呈现与上报等功能。现有成像系统的图像成像定位精度不高,较难获取存在重合区域的多个目标、体积过大等目标的准确位置信息,对于一些特定场景应用具有局限性。一些学者对光学传感器的

观测精度提升进行了大量研究,并形成重要的研究成果^[1-2],这些成果广泛应用于城市高程信息提取^[3-4]、森林覆盖分析或复杂环境的地形测绘^[1,5]等。但随着对光学成像系统精度要求的不断提升,已有成果并不能满足实际应用需求,因此,需要深入研究光学传感器的定位原理,优化影响定位精度的关键要素,提升光学成像系统精度。

本文以传统光学传感器为基础^[6],重点分析成

像系统定位原理,并分析高精度定位在提升三维成像系统定位精度中所发挥的重要价值。由此,设计车载式北斗光学三维成像系统,系统针对车载式使用模式,将北斗高精度定位接收机与多光谱扫描仪、激光测距仪、惯导设备进行融合,最终实现提升光学三维成像系统的目标。本文详细介绍成像系统实现的关键技术,并通过对比试验说明系统性能提升的量级。该系统实现在无地面控制点的情况下,光学传感器的米级定位。

2 车载式光学成像系统定位原理分析

车载式光学成像系统的定位原理为:将成像系统安装于车辆中,以车辆为载体,由载体的移动实现沿移动方向的成像扫描。通过激光进行回波探测,计算测量光线的飞行时间,以此得到系统与地面采样点间的距离,同时获取激光回波信号的典型特征。利用 GNSS 定位技术,捷联惯导技术^[7-8]等得到系统中心点位置和姿态信息。利用物方距离、中心点位置和姿态等信息,以摄影测量共线方程为理论支撑^[9],实现物方三维坐标解算。多光谱扫描仪基于被动光电成像技术,获取目标成像信息,最终经综合处理得到沿一定条带的地面区域三维定位与成像结果。图 1 为车载式光学成像系统定位示意图。

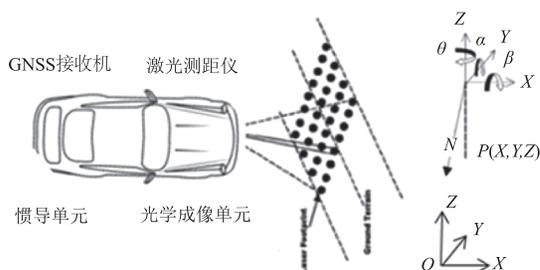


图 1 车载式光学成像系统定位原理

Fig. 1 Positioning principle of vehicle mounted imaging system

定义车载式光学成像系统的三维直角坐标系, X 轴为车辆前进方向, Y 轴指向车辆前进方向左侧, Z 轴对天。成像系统转轴和 Y 轴正向夹角为 A ,成像系统多光谱扫描镜法线和转轴夹角为 B ,其中 $0 < A, B < \pi/2$ 。

激光测距仪与多光谱成像仪的望远镜视场沿 Y 轴相反方向入射到系统扫描镜中心。以坐标原点 O 为中心,得到参考单位球面,当激光测距扫描线沿 Y 轴相反方向入射时,镜面法线和转轴夹角 B 形成一个圆锥面,该圆锥面与参考球面相交为形成一个圆。以圆上最接近 Y 轴的一点作为零点,如电机转动角

度为 ϕ ,法线和球面交点坐标为:

$$X_j = \sin B \sin \phi \quad (1)$$

$$Y_j = \sin A \sin B \cos \phi + \cos A \cos B \quad (2)$$

$$Z_j = \cos A \sin B \cos \phi - \cos A \cos B \quad (3)$$

Y 轴与法线构成的平面与 Z 轴的夹角为 γ ,入射光线到法线夹角为 δ , $A, B, \phi, \delta, \gamma$ 之间的角度关系为:

$$\tan \gamma = \frac{\sin B \sin \phi}{\cos A \sin B \cos \phi - \sin A \cos B} \quad (4)$$

$$\cos \delta = \sin A \sin B \cos \phi + \cos A \cos B \quad (5)$$

射入光线的反射光线在 Y 轴和法线确定的半平面内,反射角与入射角角度相同,与 Y 周夹角为 2δ ,当与坐标原点沿反射光到反射光和地面交点的距离为 N 时,反射光与地面交点的坐标为:

$$X_k = -N \sin 2\delta \sin \gamma \quad (6)$$

$$Y_k = -N \cos 2\delta \quad (7)$$

$$Z_k = -N \sin 2\delta \cos \gamma \quad (8)$$

利用 GNSS 接收机确定光学成像系统中心坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ,惯导设备单元确定光学成像系统的姿态参数 (α, β, θ) ,激光测距仪测定光学成像系统到地面点的距离,三维成像系统的角度测量装置测定电机的转角后,以摄影测量基本原理^[9]为基础,可得到相应地面点坐标。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$a_1 = \cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \beta \sin \theta \quad (10)$$

$$a_2 = -\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \beta \cos \theta \quad (11)$$

$$a_3 = -\sin \alpha \cos \beta \quad (12)$$

$$b_1 = \cos \beta \sin \theta \quad (13)$$

$$b_2 = \cos \beta \cos \theta \quad (14)$$

$$b_3 = -\sin \theta \quad (15)$$

$$c_1 = -\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \beta \sin \theta \quad (16)$$

$$c_2 = -\sin \alpha \sin \theta + \cos \alpha \sin \beta \cos \theta \quad (17)$$

$$c_3 = \cos \alpha \cos \beta \quad (18)$$

通过对车载式光学成像系统的定位原理分析可知,光学成像系统中的各个组成单元对系统整体定位精度均会造成影响^[10],GNSS 接收机单元和惯导设备用于确定光学成像系统的投影中心位置及姿态。其中,由 GNSS 接收机单元获取成像系统的投

影中心点坐标,其坐标精度将直接影响到最终目标物成像精度。同时,惯导设备生成三维成像系统的姿态信息,由 GNSS 和惯导的定位原理可知,如不能及时输入准确的位置信息作为惯导定位辅助,惯导的位置及姿态信息将出现发散的情况,因此,采用 GNSS 与惯导组合的定位模式,提升惯导姿态信息精度。由此可知,北斗高精度单元的定位精度也将影响到系统姿态信息的准确度。

3 车载式北斗光学三维成像系统设计及实现

3.1 系统架构设计

为提升光学传感器三维成像精度,研制具备精准测算地物三维坐标功能的车载式北斗光学成像系统,提升车辆在应用场景中的目标感知能力,为指挥提供有效信息输入。该系统由高精度北斗接收机,惯导,激光雷达,通信模块和光学图像处理平台构成,如图 2 所示。

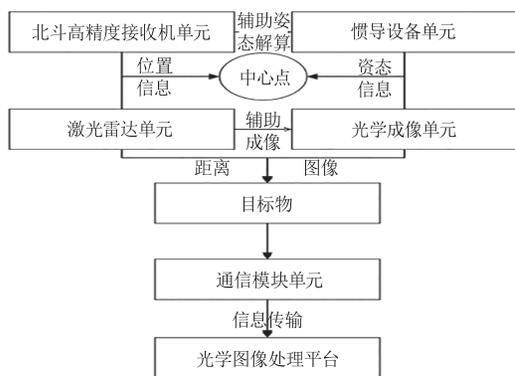


图 2 车载式北斗光学三维成像系统技术架构

Fig. 2 Technical architecture of vehicle-mounted BDS optical 3D imaging system

(1) 北斗高精度接收机单元:用于获取成像系统在车辆行进过程中的精确三维位置。传统光学成像系统采用普通定位精度接收机,定位精度为米级。本文所述系统采用的接收机支持 RTK/PPP-RTK 高精度解算,车辆可通过 4G/5G、北斗短报文等通信手段获取高精度服务,实现区域/广域范围内光学成像系统中心点坐标的厘米级位置解算。北斗高精度接收机单元可以为惯导平台提供精准的位置输入,同时可以给激光雷达精准的时间同步,保证激光雷达周期采样的时间精准度。

(2) 激光雷达单元:由激光扫描镜实现发射激光束和接收瞬时视场的物方扫描,测得光学成像系统到地面点的距离,根据几何原理计算激光点的三维位置。同时,可将激光雷达生成的点云数据处理

成高精度的空间三维数据及三维图像,用于提升成像系统的位置准确性及图像成像精度。

(3) 惯导设备单元:用于解算光学三维成像系统在车辆行进过程中的姿态参数。基于捷联惯导平台获得成像系统姿态参数。北斗高精度接收机单元、激光雷达与 IMU 形成组合导航平台,北斗高精度接收机单元为惯导设备单元提供精准位置信息输入,惯导设备单元进行位置及姿态解算不受环境影响,可以避免由于复杂环境引起光学成像系统定位精度降低,激光雷达提供距离量输入,与里程计互为校准,三者优势互补,提升成像系统精度及健壮性。

(4) 光学成像单元:车辆行进过程中,利用成像系统中心点坐标,姿态信息,激光雷达单元测得的成像系统到地面点的距离等信息,基于摄影测量原理^[9],同步获得地面的光学图像。

(5) 通信模块单元:具备 4G/5G,北斗短报文等多种通信能力,可根据光学三维成像系统需求,实时回传光学图像至光学图像处理平台,实现数据处理与解析。

(6) 光学图像处理平台:为了实时展现成像系统生成的图像信息,及时从图像中获取有价值信息,开发光学图像处理平台,平台具备光学图像与高分辨率遥感卫星影像地理位置匹配、扫描区域标定、特定区域标绘、图像裁剪、图像镶嵌等功能,具备实时可视化呈现光学图像的能力。

3.2 自适应调零抗干扰

成像系统工作过程中,由于车辆运行环境多样,而卫星导航信号较弱,极易受到信号干扰。并且干扰源方向和干扰个数未知,因此需要基于天线接收到的卫星信号进行自适应调零处理。自适应调零为多通道阵列信号空域滤波过程,与时域处理和频域处理均不同。通过自适应算法运算,可实现有用信号接收,抑制干扰信号,进而提升系统检测性能。

自适应阵列天线抗干扰处理流程如图 3 所示,抗干扰单元由接收天线阵列和自适应处理器等部件组成。其中 M 是天线阵元数, $x_m(n)$ 是第 m 个天线阵子信号, w_m^* 是复加权系数。当天线阵列单元接收信号后,由自适应处理器对复加权系数进行迭代调整,最终得到系数值。本系统融合多种自适应算法,

具备根据各种条件变化进行调整自适应调零控制能力、反应速度,以及算法实现的能力。

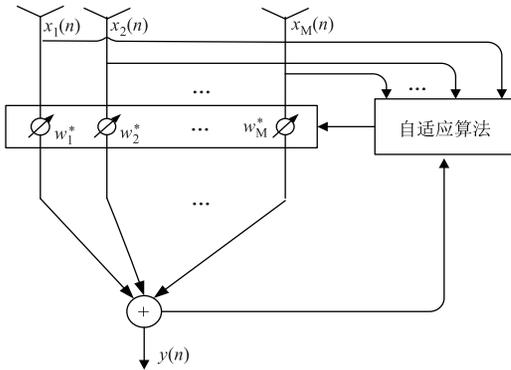


图3 自适应调零抗干扰原理

Fig. 3 Adaptive zeroing anti-jamming principle

3.3 北斗高精度接收机定位误差估算方法

北斗高精度接收机定位算法除采用 RTK/PPP-RTK 一体化算法设计外,为了增强定位结果的可信度,算法增加了定位误差估算方法。采用由滤波器相关状态量的方差-协方差、误差传播理论、可靠性理论等参数,本系数所用北斗高精度接收机开发了高精度解算 RTK/PPP-RTK 误差估算方法,通过 Stanford 绘图分析 RTK/PPP-RTK 定位误差、RTK 定位误差的估计,以及保护门限之间的关系,以此验证并估计 RTK/PPP-RTK 定位误差足够准确,同时满足 RTK/INS 组合需求。图 4 即为系统高精度定位结果误差与其通过 Stanford 估算的点位图分布,保护门限为 0.15 m。定位结果正常输出时,点位分布基本落于 Normal 运行区域, Misleading 区域代表定位结果存在偏差, Hazardously Misleading 区域代表定位结果出错。

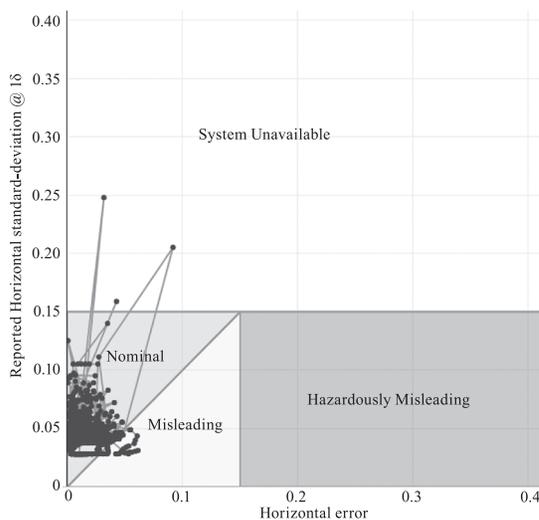


图4 基于 Stanford 的定位误差估计分布

Fig. 4 Positioning error estimation distribution based on Stanford

3.4 INS 辅助实现抗多径技术

在靠近水面,玻璃面等易造成信号反射的区域,北斗接收机定位精度会由于反射造成的多径信号的影响而产生断崖式下降,更有甚者导致卫星失锁,无法正常跟踪信号。本系统基于 INS 辅助实现多径信号的剔除,算法首先通过计算卫星仰角进行不可见卫星的剔除,其次通过比较 INS 测得的伪距值与北斗接收机测得的伪距测量值之间差值的平滑程度,进而判断由多径产生的伪距值异常。本算法主要包括以下两个步骤:

3.4.1 筛选可见卫星

北斗接收机通过星历计算卫星位置,同时通过 INS 获得的位置计算得到每颗卫星仰角的余弦值。分析当前卫星是否处在水平面以上,若存在,则认为卫星可视,进行捕获。通过这种方式可以剔除由多径产生的干扰信号,减少通道信号的冗余判断,降低算法运算量。

3.4.2 筛选符合运动轨迹的卫星

根据 INS 获得的位置、速度和星历等信息,计算卫星 j 的伪距和伪距变化率,绘制伪距变化曲线的时间序列图;搜索卫星号 j 的一对信道,与通过接收机计算的伪距组成两组时间序列;利用滑窗标准方差判断法进行判断,利用可调节因子 λ 的经验值剔除野值剔除处理后的时间序列中解算值和真实值差异大的序列,从而判断出异常伪距信号,遍历其它通道内的卫星信号,直至所有卫星处理结束。

3.5 BDS/INS 紧组合定位技术

本系统采用紧耦合定位技术提升 BDS/INS 组合性能,紧耦合输入参数为陀螺仪、加速度计、RTK/PPP-RTK 结果、姿态信息数据。紧耦合定位原理如图 5 所示,将北斗接收机伪距与伪距率与惯导单元输出的测量结果相减,并将结果输出给卡尔曼滤波器进行测量误差累积估计,将误差补偿反馈至惯导模块,经过补偿校正后的惯导测量结果输入至卡尔曼滤波器,并结合 RTK/PPP-RTK 结果最终得到组合定位结果。

紧耦合通过观测数据进行组合运算,因此当卫星数少于 4 颗时,紧耦合模式仍然可以提供卫星信号更新。紧耦合在技术实现上,较传统松耦合模式更为复杂,但鲁棒性更强,系统稳定性更高。

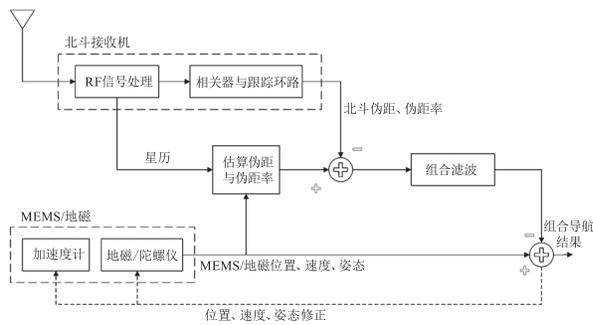


图 5 紧组合原理图

Fig. 5 Compact combination schematic diagram

4 车载式北斗光学三维成像系统定位精度试验及分析

通过试验对比本文所述系统与传统车载式光学成像系统定位精度的差异及优势。通过一辆测试车同时搭载上述两套产品,保证测试环境、测试时间的一致性。由于本次试验的目的为对比两套光学成像系统的定位差异,不针对产品性能做完整测试,因此试验选择开阔道路开展。在同一天的不同时间段,分别为 9:00~9:10,12:00~12:10,17:00~17:10 开展试验。三个时间段测试的场地及扫描的地物相同,且目标地物位置提前进行标定。三个时间段的两套系统定位结果分别为表 1 所示。

表 1 成像系统定位精度对比

Tab. 1 Comparison of positioning accuracy of imaging system

| 序号 | 时间段 | 传统成像仪定位精度(1 δ)/m | 车载式北斗光学三维成像系统定位精度(1 δ)/m |
|----|-------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1 | 9:00~9:10 | 12.15 | 1.26 |
| 2 | 12:00~12:10 | 15.36 | 2.23 |
| 3 | 17:00~17:10 | 14.37 | 2.05 |

(1) 三个时段的定位结果显示,车载式北斗光学三维成像系统定位精度明显优于传统成像仪定位结果;

(2) 三个时段的定位结果显示,两类成像仪产品的测试结果显示,9:00~9:10 的定位精度较其它两个时段更优。这是因为上午电离层较为稳定,产生的定位误差较小,也由此说明北斗定位精度对成像仪最终的定位精度产生影响;

(3) 由车载式光学成像系统定位原理可知,成像系统的定位精度与成像系统中心点坐标及姿态密切相关。由于本文所述成像系统采用北斗高精度接

收机进行成像系统中心点坐标的解算,定位精度可达厘米级,而传统成像仪采用普通北斗接收机确定中心点位置,定位精度为米级,因此成像仪最终的定位精度差异较大,本文所属成像仪较传统成像仪,定位精度可提升一个数量级;

(4) 现有北斗高精度接收机和 BDS/INS 组合技术,定位与姿态结果输出为设备预先设置的频率,无法输出任意时刻成像系统的中心点位置和姿态信息,因此需要通过内插计算产生扫描线任意时刻的位置和姿态信息。而内插计算将会产生误差,因此本文所述成像系统仍然存在定位精度优化的空间。同时,BDS/INS 的组合算法同样存在优化的空间,本文所述系统采用紧耦合的组合模式,当车辆处在树林遮蔽、城市峡谷等北斗信号时有时无、时好时坏的复杂环境时,北斗接收机无法正常定位,从而影响成像系统定位解算。因此,通过优化 BDS/INS 的组合方式,利用提升车辆部分遮挡环境下的定位精度。可以通过深耦合的组合模式进一步提升定位精度,试验分析,深耦合定位精度可达紧耦合定位精度的 3 倍。

5 结论

通过对车载式北斗光学三维成像系统的设计实现及定位原理研究,得出北斗高精度接收机的定位精度将直接影响系统成像精度的结论,采用北斗高精度接收机,可将成像仪定位精度提升一个数量级。因此,提升北斗高精度接收机的定位精度,以及北斗与惯导组合的姿态信息解算精度是提升成像系统精度的关键。同时,车载式北斗光学三维成像系统定位精度仍然存在优化的空间,比如优化位置和姿态输出的插值方式、BDS/INS/激光雷达的组合技术等。

参考文献:

- [1] Flood M, Gutelius B. Commercial implication of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar [J]. PE&RS, 1997, 53(4): 327-366.
- [2] Ward D J. Airborne terrain mapping [J]. GPS World, 1997, 46.
- [3] Hug C. Urban topography survey with scanning laser altitude and reflectance sensor [C]//The Second Int Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition California; San Francisco, 1996: 429-438.

- [4] Haala N, Gramer M, Killian J. Sensor fusion for airborne 3D data capture [C]//The Second Int Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition California; San Francisco, 1996; 344 - 353.
- [5] Kraus K, Pfeifer N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanning data ISPRS [J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1988, 53: 193 - 202.
- [6] 李树楷, 薛永祺. 遥感多维信息集成的装置与方法: 中国, 96114306. 1 [P]. 1996 - 12.
- [7] Chen Zhe. Principles of strapdown inertial navigation system [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)
陈哲. 捷联惯导系统原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [8] Dong Xurong et al. GPS/INS integrated navigation positioning and its application [M]. Changsha: National University of Defense Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)
董绪荣等. GPS/INS 组合导航定位及其应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [9] Wang Zhizhuo. Principles of photogrammetry [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1979. (in Chinese)
王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979.
- [10] Liu Shaochuang, You Hongjian, Liu Tong, et al. Positioning principle and accuracy analysis of airborne laser ranging scanning imaging mapping system [J]. Journal of Wuhan University of Surveying and Mapping Technology, 1999, 24(2): 23 - 36. (in Chinese)
刘少创, 尤红建, 刘彤, 等. 机载激光测距 - 扫描成像制图系统的定位原理与精度分析 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(2): 23 - 36.