

井下移动装备的冗余惯性测量单元定位性能*

司 奎¹, 张鹏辉¹, 王忠宾¹, 魏 东¹, 顾进恒¹, 梁 斌^{1,2}

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州, 221116)

(2. 中国矿业大学徐海学院 徐州, 221008)

摘要 为提升煤矿井下移动装备的定位精度,提出一种基于冗余惯性测量单元(inertial measurement unit,简称IMU)的数据融合与解算方法。首先,设计6种冗余IMU的布局方式,建立不同布局方式下的比力加速度和角速度融合方程与解算模型;其次,对井下移动设备的运动轨迹进行仿真模拟,并对冗余IMU的不同布局方式展开对比分析;然后,搭建轮式小车运动实验台,根据设计的轨迹进行运动位姿检测,验证正四棱锥式IMU布局在静止状态和运动状态下的位姿解算精度;最后,为进一步测试冗余IMU布局的实用性,开展履带式钻孔机器人沿“直线—坡道”轨迹的运动实验。结果表明:正四棱锥式IMU布局具有更小的位置误差与姿态解算误差,优于其他冗余布局方式;正四棱锥式IMU布局解算的俯仰角、航向角、横滚角平均绝对误差分别为 0.4794° 、 0.2108° 、 0.2143° ,在东、北、天方向位移的平均绝对误差分别为 0.1133 、 0.0752 、 0.1669 m,证明该布局方式可更好地抑制误差累积。

关键词 井下移动装备;惯性测量单元;冗余布局;精确定位

中图分类号 TH6;TD42

引 言

煤炭生产是典型的高危、艰苦行业,现有煤矿装备需要技术工人直接或间接参与,导致成本高且安全隐患突出^[1]。随着我国煤矿开采深度和强度的不断加大,矿震、冲击地压等煤矿动力灾害的发生频率与强度正急剧攀升^[2]。因此,煤矿井下的无人化、少人化作业已刻不容缓,而解决井下移动装备的精确定位问题则是实现该目标的关键技术所在。

常用的定位方法主要包括无线通讯系统、惯性传感器、视觉传感器、激光指引和全站仪测量等技术^[3-4]。然而,煤矿井下存在环境恶劣、巷道狭窄、多粉尘、光照差等多种不利因素,致使卫星导航、视觉传感及无线通信等地面常用技术难以直接应用。IMU可依据自身测得的比力加速度和角速度推算运动轨迹和姿态,因其不依赖外部信息,独立性强,故能更好地适应煤矿井下的恶劣工作环境。随着惯性导航技术的快速发展,IMU在自主定位方面的应用越来越广泛,该技术通过对加速度一次积分获得载体速度,进行二次积分可确定载体位置^[5]。然而,基于此原理的惯性导航系统(inertial navigation system,简称INS)存在着明显缺点:为获取载体位姿,

需对加速度计与陀螺仪输出进行多次积分,致使误差随时间不断累积^[6]。

为此,国内外许多学者已开展大量研究工作。Guan等^[7]提出了一种用于可见光定位的松耦合可见光定位-惯性融合方法,并实现了2.1 cm的平均精度(固定定位)。Liu等^[8]通过INS/全球定位系统(global positioning system,简称GPS),提出了一种基于带衰减因子的自适应卡尔曼滤波器噪声抑制导航技术,经测试,该算法的精度比传统自适应卡尔曼滤波器提高20%。Wen等^[9]提出了一种基于卡尔曼滤波的AdaGrad算法,用于校准惯性测量装置,结果表明,该方法可有效修正惯性测量装置静态测试和车载现场测试存在的偏差。郁露等^[10]提出了一种基于超宽带(ultra wide band,简称UWB)和IMU的煤矿机器人紧组合定位方法,通过将4个UWB基站等高对称布置,使得定位的均方根误差从0.1464 m减小到0.1364 m。

马艾强等^[11]提出了一种适用于煤矿巷道环境的激光雷达与IMU融合的实时定位与建图方法,其三轴方向的绝对定位误差均值和中值均小于32 cm;对x轴方向的位姿估计精度最高,其累计误差与位置偏差分别为1.65、2.97 m。曹波等^[12]提出了采煤

* 国家自然科学基金资助项目(52174152,52204179);国家重点研发计划资助项目(2020YFB1314200)

收稿日期:2023-05-04;修回日期:2023-06-03

工作面端头自主修正方法,以补偿惯性导航定位装置的漂移误差, x 轴、 z 轴方向的平均误差分别从0.102、0.194 m降至0.082、0.158 m,实现了采煤机长期高精度自主循环截割。刘正午等^[13]提出了基于伪距残差和新息的全球导航卫星系统/IMU抗差自适应定位算法,结果表明,相较于扩展卡尔曼滤波方法,该算法在东、北和天方向上的定位精度分别提高了36.05%、22.71%和56.22%。

尽管已有大量研究致力于移动装备的定位问题,但分析表明,现有工作对IMU累积误差的抑制主要集中于优化IMU滤波算法或引入其他设备辅助定位等手段,缺少通过探索IMU的新结构或新布局等从根本上降低定位误差累积的研究。针对上述问题,笔者将导致漂移的误差划分为确定性误差和非确定性误差,设计6种IMU的冗余布局方式,研究冗余IMU的数据融合模型和位姿解算过程,并通过仿真分析和实验测试,对比分析不同冗余IMU布局的定位性能。

1 冗余IMU的数据融合与解算

1.1 坐标系建立与转化过程

井下移动装备位姿解算即对其自身的三轴比力加速度和三轴角速度进行解算,需要建立相应坐标系以方便计算。图1为建立的坐标系示意图。图中惯性坐标系表示为*i*,其原点位于地球中心, x 轴位于赤道平面, z 轴方向沿地球极轴, y 轴、 x 轴和 z 轴方向构成右侧螺旋系;地球坐标系与地球固定相连,表示为*e*,其原点位于地球中心, x 轴指向赤道与格林尼治子午线的交点, z 轴与惯性坐标系重合, y 轴由右手螺旋法则确定;导航坐标系以*n*表示,用于分析移动装备的定位误差,其原点位于装备工作区域的起始位置, x 轴、 y 轴和 z 轴分别指向东方、北方和天空;载体坐标系表示为*b*,固定连接至井下移动装备,其原点位于移动装备的重心,移动装备的前进方向为 x 轴方向, z 轴垂直于移动装备载体平面, y 轴也由右手螺旋法则确定。

井下移动装备的位置和姿态信息在导航坐标系中计算,IMU感知的装备运动特性则相对于载体坐标系进行计算,因此需要建立坐标系的转换矩阵。为方便描述载体位姿信息,将 z 轴、 y 轴和 x 轴的姿态角分别定义为航向角 φ 、横滚角 γ 和俯仰角 θ 。导航坐标系到载体坐标系的姿态转换矩阵可由旋转矩阵的传递性获得。

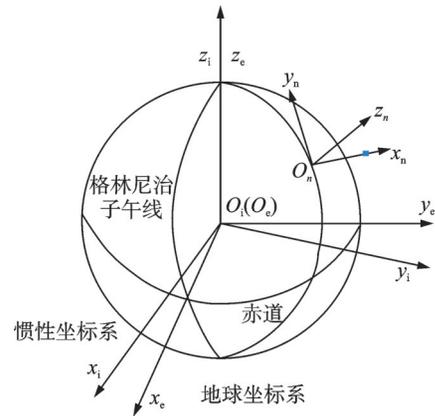


图1 建立的坐标系示意图

Fig.1 Diagram of established coordinate system

1.2 冗余IMU的布局方式

采用IMU对井下移动设备进行位姿检测时,因受温度、振动及在载体不同位置的影响,IMU的测量参数与载体的真实运动参数有一定误差,且误差经过一系列的积分解算会逐渐累计变大。可通过冗余IMU特定的布局方式,尽可能地抵消确定性误差,均化并减小非确定性误差。结合IMU的工作原理与文献[6],本研究设计的6种方案冗余IMU的布局方式如图2所示。

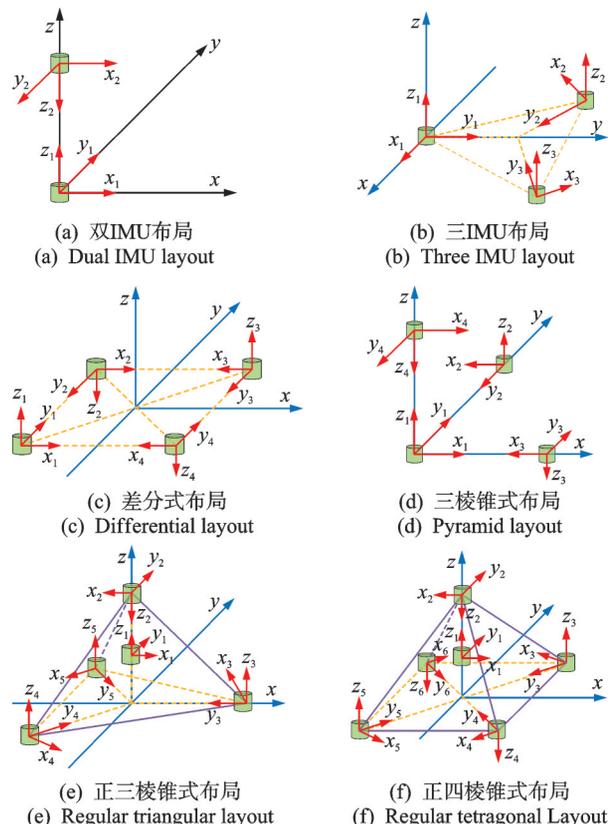


图2 冗余IMU的布局方式

Fig.2 Layout of redundant IMUs

如图2(a)所示,双IMU布局沿竖直方向上下布置2个IMU。如图2(b)所示,三IMU布局为正三角形平面布局,3个IMU的 y 轴均沿角平分线指向正三角形中心, z 轴均指向天方向, x 轴的指向服从右手螺旋法则。差分式布局^[14]如图2(c)所示,4个IMU成差分结构分布于正方形平面的4个顶点,相邻2个IMU均有2个坐标轴反向布局。如图2(d)所示,三棱锥式布局采用直角三棱锥外形,4个IMU分布于三棱锥的4个顶点处,且2、3、4号IMU与1号IMU的距离均相同,相邻2个IMU均有2个坐标轴反向布局。正三棱锥式布局如图2(e)所示,5个IMU分布于正三棱锥的4个顶点及中心处,底部采用三IMU布局,顶部采用双IMU布局。正四棱锥式布局如图2(f)所示,底部采用差分式布局, y 轴均沿矩形对角线指向坐标轴中心, z 轴指向与差分式布局相同, x 轴指向均服从右手螺旋法则,顶部采用双IMU布局方式。

分析表明,当IMU的三轴方向与待测物体坐标系的三轴方向重合时,IMU对待测物体运动参数的感知最为灵敏。当井下设备运动时,振动方向沿机载坐标系的三轴方向传递,此时IMU所采集的设备运动参数中含有大量振动干扰信息,进而影响后续的位姿解算精度。因此,笔者将IMU坐标系与待测物体坐标系成一定角度放置,降低IMU对待测物体运动参数变化的敏感程度,一定程度上降低了载体振动对IMU信号的干扰,同时采用多个IMU的空间布局,进一步降低累计误差。

1.3 数据融合方程建立

1.3.1 角速度融合方程

通过分析图2中不同布局方案,可建立以下角速度融合方程。

双IMU布局的角速度融合方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \omega_{1x} + \omega_{2x} \\ \omega_{1y} - \omega_{2y} \\ \omega_{1z} - \omega_{2z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

三IMU布局的角速度融合方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \omega_{1x} + \frac{1}{2}(\sqrt{3}\omega_{2y} - \omega_{2x}) - \frac{1}{2}(\sqrt{3}\omega_{3x} + \omega_{3y}) \\ \omega_{1y} - \frac{1}{2}(\omega_{2x} + \sqrt{3}\omega_{2y}) + \frac{1}{2}(\sqrt{3}\omega_{3x} - \omega_{3y}) \\ \omega_{1z} + \omega_{2z} + \omega_{3z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

差分式布局的角速度融合方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \omega_{1x} + \omega_{2x} - \omega_{3x} - \omega_{4x} \\ \omega_{1y} - \omega_{2y} - \omega_{3y} + \omega_{4y} \\ \omega_{1z} + \omega_{2z} + \omega_{3z} + \omega_{4z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

三棱锥式布局的角速度融合方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \omega_{1x} - \omega_{2x} - \omega_{3x} + \omega_{4x} \\ \omega_{1y} - \omega_{2y} + \omega_{3y} - \omega_{4y} \\ \omega_{1z} + \omega_{2z} + \omega_{3z} + \omega_{4z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

正三棱锥式布局的角速度融合方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} \omega_{1x} - \omega_{2x} - \omega_{3x} + \frac{1}{2}(\sqrt{3}\omega_{4x} - \omega_{4y}) + \\ \frac{1}{2}(\sqrt{3}\omega_{5y} - \omega_{5x}) \\ \omega_{1y} + \omega_{2y} + \omega_{3x} + \frac{1}{2}(\omega_{4x} + \sqrt{3}\omega_{4y}) - \\ \frac{1}{2}(\sqrt{3}\omega_{5x} + \omega_{5y}) \\ \omega_{1z} - \omega_{2z} + \omega_{3z} + \omega_{4z} + \omega_{5z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

正四棱锥式布局的角速度融合方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} \omega_{1x} - \omega_{2x} - \frac{\sqrt{2}}{2}((\omega_{3x} + \omega_{3y}) - (\omega_{4x} + \omega_{4y}) + \\ (\omega_{5x} + \omega_{5y}) + (\omega_{6x} + \omega_{6y})) \\ \omega_{1y} + \omega_{2y} + \frac{\sqrt{2}}{2}((\omega_{3x} - \omega_{3y}) + (\omega_{4y} - \omega_{4x}) + \\ (\omega_{5y} - \omega_{5x}) + (\omega_{6x} - \omega_{6y})) \\ \omega_{1z} - \omega_{2z} + \omega_{3z} - \omega_{4z} + \omega_{5z} - \omega_{6z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.3.2 比力加速度融合方程

不同冗余IMU布局模型的比力加速度融合方程与角速度融合方程类似。从上述融合方程可以看出,不同结构的冗余IMU布局可不同程度地消除确定性误差。由于大小和方向均未知,融合后非确定性误差可保持在较低水平,且部分特殊时间点的非确定性误差基本消除,从而抑制了误差的快速积累。

1.4 冗余IMU的位姿解算过程

1.4.1 移动装备的姿态解算

采用四元数法更新井下移动装备的姿态参数,四元数由1个实单位和3个虚单位组成。移动装备的载体坐标系相对于导航坐标系的坐标转换可用四元数唯一表示。基于此,由四元数计算的移动设备

姿态角为

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left[\frac{2(q_2q_3 + q_0q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right] \\ \arcsin [2(q_0q_2 - q_1q_3)] \\ \arctan \left[\frac{2(q_1q_2 + q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right] \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中： q_0, q_1, q_2 和 q_3 分别为四元数微分方程中的4个系数。

1.4.2 移动装备的位置解算

由于井下移动装备的位移远小于地球的曲率半径,在运动过程中可认为曲率半径保持不变。因此,定义移动装备的起始中心为原点, x 轴指向东方, y 轴指向北方, z 轴指向垂直于当地水平面的上方。在该坐标系中,移动装备的空间位置描述为

$$\begin{cases} X_t = X_{t-1} + v_x^n \Delta t \\ Y_t = Y_{t-1} + v_y^n \Delta t \\ Z_t = Z_{t-1} + v_z^n \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

其中： X_t, Y_t, Z_t 分别为移动装备在时间 t 的位置； $X_{t-1}, Y_{t-1}, Z_{t-1}$ 分别为移动装备在时间 $t-1$ 的位置； v_x^n, v_y^n, v_z^n 分别为移动装备在导航坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴上的更新速度投影。

位姿解算精度,首先对移动装备的运动轨迹进行模拟。在仿真环境下,移动设备的坐标系为 m ,运动轨迹的切线方向与坐标系 y 轴方向一致, x 轴沿运动轨迹切线方向指向右侧, z 轴符合右手螺旋法则。此外,比力加速度和角速度均在此坐标系中定义。

图3为模拟运动轨迹,展示了不同冗余IMU布局方式的模拟运动位置和姿态解算结果。可以看出,三棱锥式、正三棱锥式和正四棱锥式布局的轨迹解算误差最小。在仿真运动后期,随着误差的不断累积,其他误差补偿方案的运动轨迹已明显偏离实际轨迹,而上述3种冗余IMU布局结构仍具有良好的收敛性。

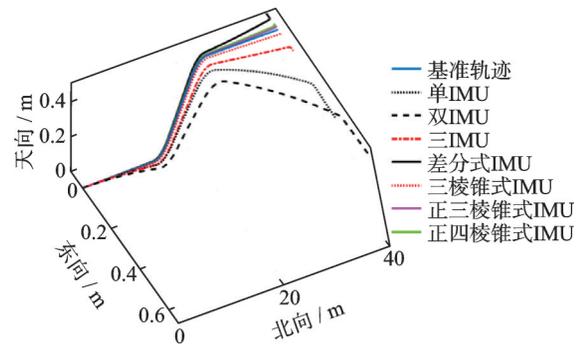


图3 模拟运动轨迹

Fig.3 Simulated motion path

2 仿真分析

为比较不同误差补偿方案在不同运动状态下的

为更加直观地比较仿真结果,模拟运动轨迹误差如图4所示,展示了仿真环境下各误差补偿方案沿仿真轨迹移动时的三轴姿态角和三轴位移的误差

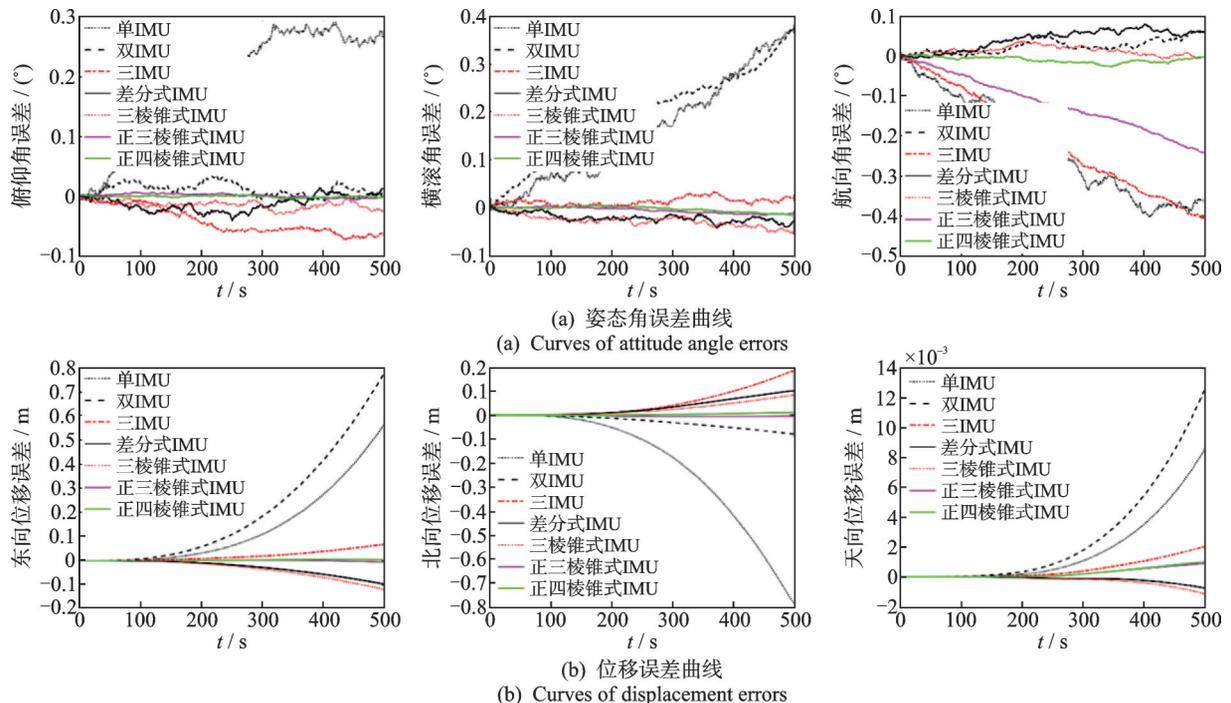


图4 模拟运动轨迹误差

Fig.4 Calculation errors of simulated motion path

比较曲线。由图可知,三棱锥式、正三棱锥式和正四棱锥式空间阵列式模型的求解效果均明显优于平面式布局(双IMU、三IMU和差分式布局),且笔者设计的正四棱锥空间阵列式IMU布局在姿态角和位移方面的最大误差(maximum error,简称MA)和平均绝对误差(mean absolute error,简称MAE)明显优于平面式布局,略微优于其他空间阵列式布局。此外,相比于正三棱锥式布局,正四棱锥式布局的航向角更加平稳,这是因为正四棱锥式布局采用差分式底层布局,增强了航向角误差补偿的效果。

3 实验测试

煤矿井下移动装备以轮式和履带式运动形式为主,为验证冗余IMU的不同布局方式在真实运动环境下的定位性能,笔者在煤矿井下移动装备的真实工作环境下进行了轮式小车运动实验和履带式钻机机器人运动实验。

3.1 轮式小车运动实验

轮式小车运动实验如图5所示。实验中小车的运动轨迹由3段直线组成,具体运动过程为:小车初始状态位于 P_1 处静止,且车身与 P_1P_2 段直线保持平行,即与正前方呈 30° 夹角; t_1 时刻,小车开始沿 P_1P_2

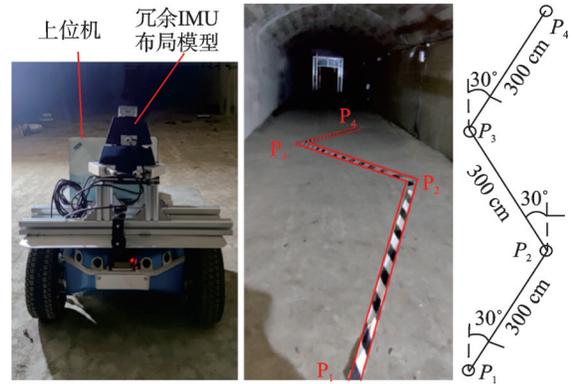


图5 轮式小车运动实验

Fig.5 Motion experiment of wheeled trolley

段直线运动300 cm; t_2 时刻到达 P_2 点,并逆时针旋转 60° ; t_3 时刻沿 P_2P_3 段直线运动300 cm; t_4 时刻到达 P_3 点,并顺时针旋转 60° ; t_5 时刻沿 P_3P_4 段直线运动300 cm,到达终点 P_4 停止运动。小车的加速度为 50 cm/s^2 ,速度设置为 15 cm/s ,转动角速度设置为 $\pi/20 \text{ rad/s}$,通过安装在机身上的高精度INS/GPS组合系统(姿态角精度为 0.005° ,位置精度为 0.002 m)获取小车的真实位姿参数。

利用前文设计的不同冗余IMU布局模型测量轮式小车的位姿参数,并与参考轨迹进行对比分析。轮式小车运动误差曲线如图6所示。由图6(a)可知,导航坐标系下的三轴角度伴随着移动小车的移动均产生一定偏差,但正四棱锥式IMU布局的

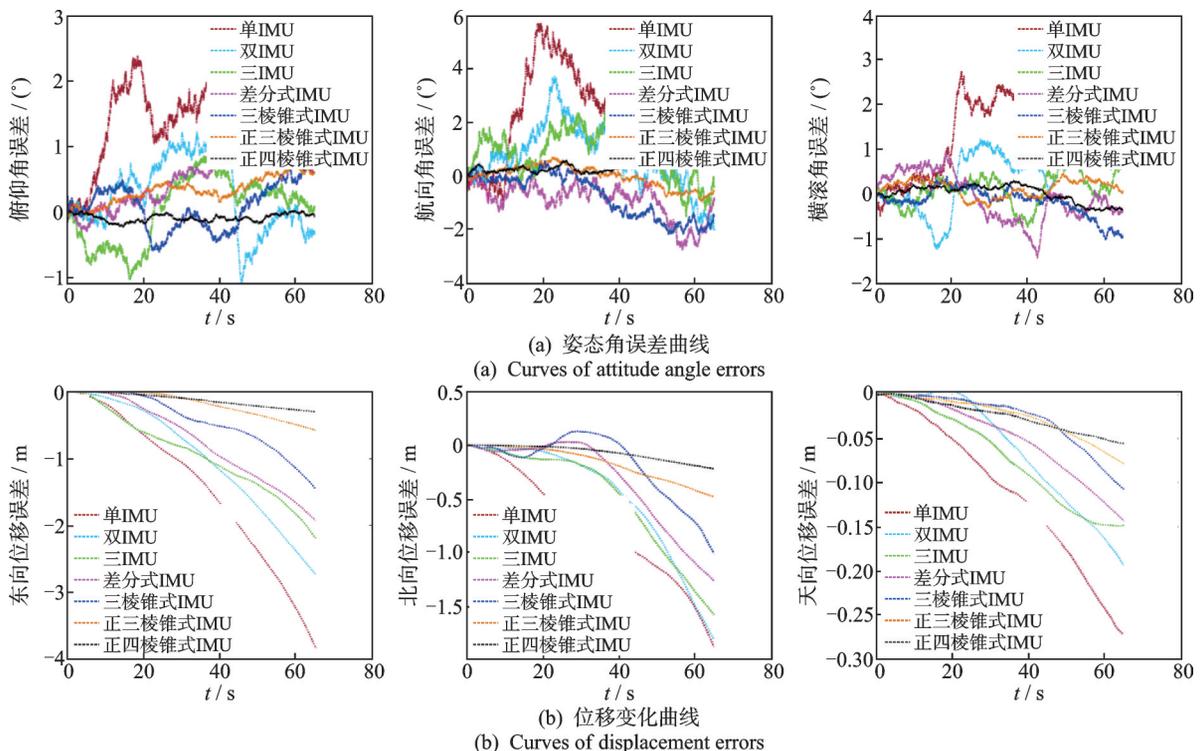


图6 轮式小车运动误差曲线

Fig.6 Curves of motion errors of wheeled trolley

三轴角度MA和MAE均表现出较好的稳定性和准确性,其俯仰角、航向角和横滚角的MA分别为 0.2170° 、 0.6685° 和 0.3927° ,MAE分别为 0.0812° 、 0.3178° 和 0.1620° 。轮式小车运动误差比较见表1。进一步分析发现,小车在直线运动时,正四棱锥式IMU布局的各轴角度收敛性最好,误差曲线最平

稳;当小车位于 P_2 、 P_3 处开始转向时,其他布局模型均产生不同程度的粗大误差,这是三轴角度误差的主要来源;正四棱锥式IMU布局在小车做转向运动时,各轴角度依旧平稳。分析结果表明,正四棱锥式IMU布局的三轴角度测量精度在静止状态和运动状态均展现出较好的优越性。

表1 轮式小车运动误差比较

Tab.1 Comparison of motion errors of wheeled trolley

布局方式	俯仰角度/($^\circ$)		横滚角度/($^\circ$)		航向角度/($^\circ$)		东向位移/m		北向位移/m		天向位移/m	
	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE
单IMU	2.395 4	1.302 3	3.046 8	1.740 3	5.708 8	2.302 3	3.841 3	1.433 8	1.873 0	0.749 3	0.272 6	0.109 0
双IMU	1.373 9	0.506 3	1.234 1	0.629 3	3.692 7	1.048 5	2.741 1	0.987 0	1.807 6	0.467 5	0.193 7	0.061 7
三IMU	1.029 9	0.448 2	0.916 9	0.293 1	3.073 3	1.150 3	2.188 5	0.932 9	1.575 9	0.481 0	0.149 4	0.070 6
差分式IMU	1.238 5	0.545 1	1.426 3	0.452 2	2.802 2	0.926 5	1.923 6	0.736 1	1.259 9	0.335 5	0.143 5	0.049 1
三棱锥式IMU	0.912 0	0.305 2	1.019 3	0.244 7	2.222 5	0.837 6	1.450 0	0.435 4	1.008 2	0.222 8	0.107 6	0.026 7
正三棱锥式IMU	0.792 5	0.344 6	0.462 0	0.193 0	0.980 0	0.326 8	0.571 6	0.182 6	0.484 7	0.165 7	0.079 0	0.024 6
正四棱锥式IMU	0.2170	0.081 2	0.392 7	0.162 0	0.668 5	0.317 8	0.297 8	0.124 8	0.222 1	0.071 4	0.055 8	0.024 3

由图6(b)和表1可以看出,正四棱锥式IMU布局位移的MA、MAE的稳定性和准确性较好,其东、北、天方向位移的MA分别为 0.2978 、 0.2221 和 0.0558 m,MAE分别为 0.1248 、 0.0714 和 0.0243 m。此外,分析三轴位移误差可知,由于模拟巷道环境的地面较为平整,天向位移误差小于其他2个方向。且伴随着运动时间的增加,各布局方式的三轴位移误差呈现发散趋势,但正四棱锥式IMU布局可更好地抑制误差漂移和累积。

3.2 履带式钻孔机器人运动实验

为进一步验证冗余IMU布局的实用性,开展了如图7所示的履带式钻孔机器人运动实验。实验中钻孔机器人的运动轨迹由水平直线运动和坡道直线运动组成。钻孔机器人位于起始点处的初始状态为静止状态,然后开始沿直线运动600 cm,到达水平面与坡道的交汇处后,再沿坡道直线运动600 cm即到达终点。通过控制行走液压马达使钻孔机器人的速度保持 0.1 m/s,其真实运动位姿参数也由高精度的INS/GPS组合系统获取。

利用冗余IMU的不同布局模型解算出的钻孔机器人位姿误差。钻孔机器人运动误差曲线、运动误差比较分别如图8、表2所示。可以看出,随着钻孔机器人的移动,导航坐标系下的三轴角度均产生一定偏差,但正四棱锥式IMU布局的位姿解算精



图7 履带式钻孔机器人运动实验

Fig.7 Motion experiment of crawler drilling robot

度最优,其俯仰角、横滚角和航向角的MA分别为 1.1175° 、 0.6532° 和 0.7961° ,MAE分别为 0.4794° 、 0.2143° 和 0.2108° ;在东、北、天方向位移的MA分别为 0.3726 、 0.2704 和 0.3883 m,MAE分别为 0.1133 、 0.0752 和 0.1669 m。进一步分析发现,基于不同冗余IMU模型的钻孔机器人位移和姿态解算精度均低于轮式小车的位姿精度。这是由于履带式移动装备移动过程中自身的振动较大,导致IMU采集的比力加速度信号受到强烈干扰,因此经积分得到的位姿参数发生漂移,致使解算误差快速累积。

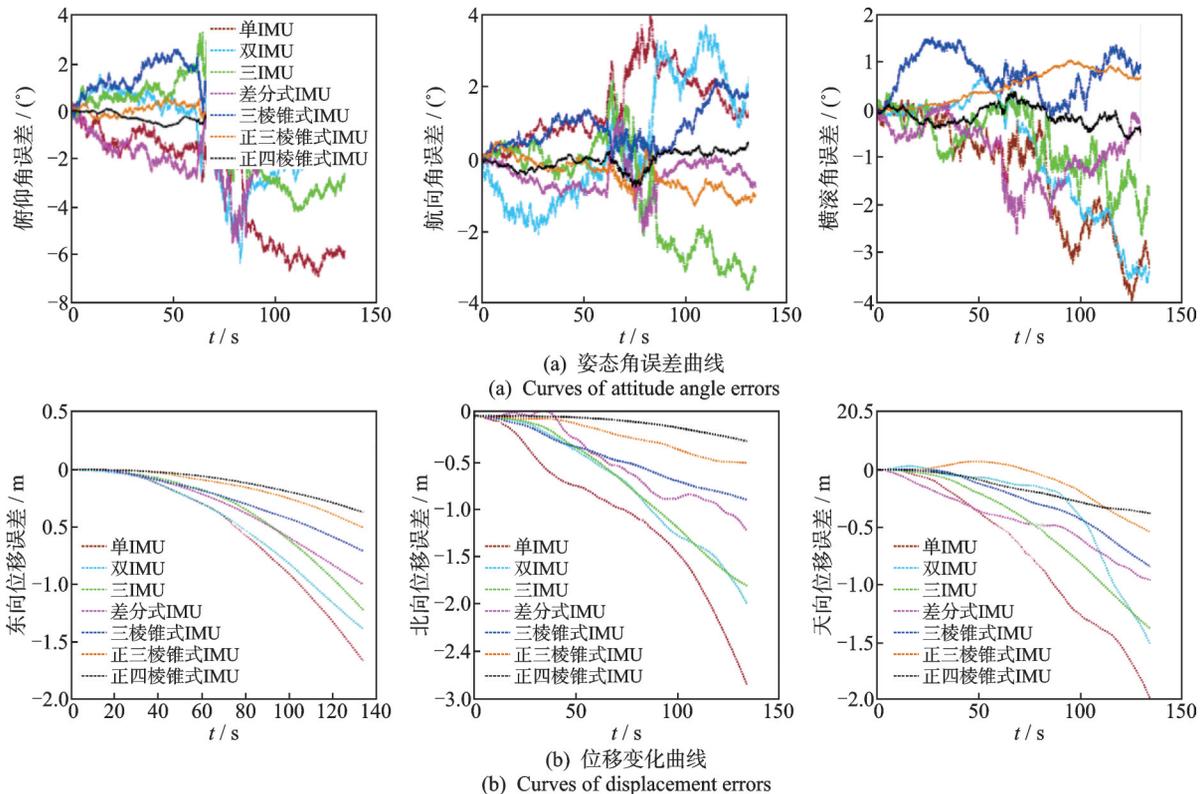


图8 钻孔机器人运动误差曲线

Fig.8 Curves of motion errors of drilling robot

表2 钻孔机器人运动误差比较

Tab.2 Comparison of motion errors of drilling robot

布局方式	俯仰角度/(°)		横滚角度/(°)		航向角度/(°)		东向位移/m		北向位移/m		天向位移/m	
	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE
单IMU	6.934 9	3.017 7	4.079 0	1.361 8	3.995 7	1.443 3	1.662 0	0.531 0	2.855 8	1.046 1	1.998 0	0.724 3
双IMU	6.372 5	1.626 8	3.670 0	1.076 6	3.735 8	1.464 2	1.384 4	0.482 1	1.998 0	0.724 3	1.523 7	0.321 5
三IMU	4.239 4	1.775 7	2.690 7	0.749 6	3.681 5	1.280 5	1.219 5	0.361 8	1.807 6	0.702 8	1.384 4	0.482 4
差分式IMU	5.540 9	1.812 7	2.638 6	0.873 7	2.086 4	0.534 7	0.999 3	0.347 1	1.217 8	0.488 1	0.963 2	0.437 7
三棱锥式IMU	2.744 2	1.333 2	1.520 1	0.754 8	2.225 4	0.864 9	0.707 2	0.259 8	0.892 1	0.441 4	0.844 9	0.271 8
正三棱锥式IMU	1.429 9	0.475 0	1.028 9	0.476 0	1.327 8	0.506 6	0.504 3	0.152 6	0.501 6	0.208 4	0.546 4	0.150 4
正四棱锥式IMU	1.117 5	0.479 4	0.653 2	0.214 3	0.796 1	0.210 8	0.372 6	0.113 3	0.270 4	0.075 2	0.383 3	0.166 9

4 结 论

1) 设计了冗余IMU的不同布局模型,建立了不同布局结构的数据融合模型和解算流程。通过仿真测试,对比分析了不同冗余IMU模型的位姿解算误差抑制性能。轮式小车运动实验和履带式钻孔机器人运动实验结果表明,正四棱锥式IMU布局在静止状态和运动状态下均表现出优异的位姿解算性能;通过优化冗余IMU的布局方式,可有效抑制运动姿态突变与振动干扰引起的误差累积。

2) 由于井下移动装备自身振动、道路障碍等因

素引发的非确定性误差大小和方向均不可预测,导致位姿解算过程中的误差仍会不断累积且无法收敛。在后续研究中,笔者拟利用UWB技术对井下移动设备的位姿解算误差进行补偿,以进一步抑制累计误差。

参 考 文 献

[1] ZHANG Y, WANG Y H, ZHAO X, et al. Dynamic probabilistic risk assessment of emergency response for intelligent coal mining face system, case study: gas overrun scenario[J]. Resources Policy, 2023, 85(8):

- 103995.
- [2] XUE Y R, SONG D Z, CHEN J Q, et al. Integrated rock-burst hazard estimation methodology based on spatially smoothed seismicity model and Mann-Kendall trend test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 163: 105329.
- [3] SINGH S K, BANERJEE, B P, RAVAL S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(2): 133-154.
- [4] 王国法, 任怀伟, 庞义辉, 等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 1-27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 1-27. (in Chinese)
- [5] LYU P, WANG B Q, LAI J Z, et al. A factor graph optimization method for high-precision IMU-based navigation system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-12.
- [6] 王开瑞, 张永德, 刘云辉. 基于惯性导航与电磁导航融合的靶器官运动跟踪方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 177-187.
WANG Kairui, ZHANG Yongde, LIU Yunhui. Research on target organ motion tracking method based on the fusion of inertial navigation and electromagnetic navigation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 177-187. (in Chinese)
- [7] GUAN W P, HUANG L Y, HUSSAIN B, et al. Robust robotic localization using visible light positioning and inertial fusion[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(6): 4882-4892.
- [8] LIU Y H, FAN X Q, CHEN L, et al. An innovative information fusion method with adaptive Kalman filter for integrated INS/GPS navigation of autonomous vehicles[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 100: 605-616.
- [9] WEN Z Y, YANG G L, CAI Q Z. An improved calibration method for the IMU biases utilizing KF-based AdaGrad algorithm[J]. *Sensors*, 2021, 21(15): 5055.
- [10] 郁露, 唐超礼, 黄友锐, 等. 基于UWB和IMU的煤矿机器人紧组合定位方法研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(12): 79-85.
YU Lu, TANG Chaoli, HUANG Yourui, et al. Research on tightly combined positioning method of coal mine robot based on UWB and IMU[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(12): 79-85. (in Chinese)
- [11] 马艾强, 姚顽强, 蔺小虎, 等. 面向煤矿巷道环境的LiDAR与IMU融合定位与建图方法[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(12): 49-56.
MA Aiqiang, YAO Wanqiang, LIN Xiaohu, et al. Coal mine roadway environment-oriented LiDAR and IMU fusion positioning and mapping method[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(12): 49-56. (in Chinese)
- [12] 曹波, 王世博, 葛世荣, 等. 基于IMU/UWB的井下采煤工作面端头采煤机定位试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(6): 217-228.
CAO Bo, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Research on shearer positioning experiment based on IMU and UWB at the end of underground coal mining working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(6): 217-228. (in Chinese)
- [13] 刘正午, 孙蕊, 蒋磊. 基于伪距残差和新息的GNSS/IMU抗差自适应定位算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(4): 1316-1324.
LIU Zhengwu, SUN Rui, JIANG Lei. Robust adaptive position algorithm for GNSS/IMU based on pseudorange residual and innovation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(4): 1316-1324. (in Chinese)
- [14] 司垒, 王忠宾, 谭超, 等. 基于差分式惯性传感组件的采煤机位姿解算法[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(2): 220-227.
SI Lei, WANG Zhongbin, TAN Chao, et al. Differential inertial sensing component based coal mining machine position attitude solution algorithm[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(2): 220-227. (in Chinese)



第一作者简介: 司垒,男,1987年7月生,博士、副教授。主要研究方向为煤矿智能化开采装备、煤矿机器人。曾发表《A novel positioning method of anti-punching drilling robot based on the fusion of multi-IMUs and visual image》(《ISA Transactions》2023, Vol.173)等论文。
E-mail: sileicool@163.com

通信作者简介: 王忠宾,男,1972年3月生,博士、教授。主要研究方向为煤矿智能化开采装备、特种环境机器人。
E-mail: wzbcme@163.com