



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107635709 A

(43)申请公布日 2018.01.26

(21)申请号 201580077404.3

(22)申请日 2015.12.29

(30)优先权数据

62/099,859 2015.01.05 US

14/928,496 2015.10.30 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.09.04

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2015/067888 2015.12.29

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/111887 EN 2016.07.14

(71)申请人 肯塔基大学研究基金会

地址 美国肯塔基州

(72)发明人 张裕明 张卫洁

(74)专利代理机构 上海脱颖律师事务所 31259

代理人 脱颖

(51)Int.Cl.

B23K 9/095(2006.01)

G01C 21/16(2006.01)

G01C 25/00(2006.01)

G01P 21/00(2006.01)

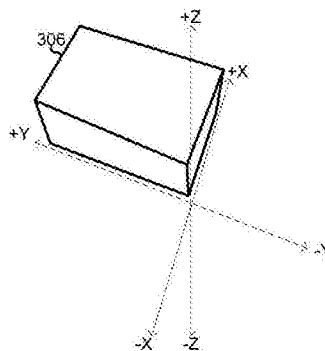
权利要求书2页 说明书15页 附图11页

(54)发明名称

用于手工电弧焊过程的三维焊炬取向的测量

(57)摘要

本文提供了用于测量3D装置(例如,手动工具或工具附件)取向的方法和系统。示例性实现使用了自动归零算法,其结合了基于四元数的无迹卡尔曼滤波器。示例性实现使用了具有三轴陀螺仪和三轴加速度计的微型惯性测量单元。自动归零算法用作在线校准程序来补偿陀螺仪漂移,这已经被验证可以显著提高三维的估计精确度,特别是在航向估计中。



1. 一种方法,其包括:
 - 接收来自固定到装置上的惯性测量单元的信号;
 - 分析所述信号以检测所述装置是否处于准静态平衡中;
 - 基于在所述装置处于所述准静态平衡期间接收的所述信号的一部分产生重力加速度向量;以及
 - 基于所述重力加速度向量执行所述惯性测量单元的实时校准。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中所述执行所述实时校准包括确定所述惯性测量单元的坐标系的轴与所述重力加速度向量之间的角度。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中所述执行所述实时校准包括确定所述惯性测量系统的陀螺仪的初始角度。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中所述执行所述实时校准包括确定角漂移的速率。
5. 根据权利要求1所述的方法,其包括基于所述信号并且基于在所述实时校准期间确定的值来实时地确定所述惯性测量单元的取向。
6. 根据权利要求5所述的方法,其包括使用无迹卡尔曼滤波器处理所述信号。
7. 一种方法,其包括:
 - 在其中已知装置处于准静态平衡的时间间隔期间:
 - 经由收发器从固定到所述装置的惯性测量单元接收第一组陀螺仪输出样本;由处理器计算用于所述第一组陀螺仪输出样本的一个或多个度量;
 - 在操作所述装置期间:
 - 经由所述收发器从固定到所述装置的所述惯性测量单元接收第二组陀螺仪输出样本;
 - 由所述处理器计算用于所述第二组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量;
 - 由所述处理器基于所述第一组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量和所述第二组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量来产生所述装置是否处于所述准静态平衡的判定;以及
 - 由所述处理器基于所述第二组陀螺仪样本以及基于所述装置是否处于所述准静态平衡的所述判定来确定所述装置的角速度。
8. 根据权利要求7所述的方法,其包括基于所述第一组陀螺仪输出样本的平均值确定所述陀螺仪的漂移。
9. 根据权利要求8所述的方法,其包括在所述确定所述装置的所述角速度期间使用所述陀螺仪的所述漂移。
10. 根据权利要求8所述的方法,其中:
 - 如果所述判定是所述装置处于所述准静态平衡中,则所述装置的所述角速度的所述确定包括
 - 将所述角速度确定为所述第二组陀螺仪输出样本的平均值;以及
 - 如果所述判定是所述装置不处于所述准静态平衡中,则所述角速度的所述确定包括对所述漂移的补偿。
11. 根据权利要求7所述的方法,其中所述角速度的所述确定包括补偿在产生第一组陀螺仪输出样本期间所述惯性测量单元的温度与在产生所述第二组陀螺仪输出样本期间所述惯性测量单元的温度之间的差。

12. 根据权利要求7所述的方法,其中所述一个或多个度量包括平均值和标准偏差中的一个或两者皆有。

13. 根据权利要求7所述的方法,其中所述产生所述装置是否处于所述准静态平衡的所述判定包括确定所述第一组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量和所述第二组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量之间的差或绝对差。

14. 根据权利要求7所述的方法,其中所述时间间隔是毫秒量级。

15. 一种系统,其包括:

计算设备,所述计算设备包括接收器和处理器,其中:所述接收器配置成

在其中已知装置处于准静态平衡的时间间隔期间从固定到所述装置上的惯性测量单元接收第一组陀螺仪输出样本;以及

在操作所述装置期间,从固定到所述装置上的所述惯性测量单元接收第二组陀螺仪输出样本;以及

所述处理器配置成:

计算用于所述第一组陀螺仪输出样本的一个或多个度量;

计算用于所述第二组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量;

基于所述第一组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量和所述第二组第二陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量来产生所述装置是否处于所述准静态平衡的判定;以及

基于所述第二组陀螺仪样本以及基于所述装置是否处于所述准静态平衡的所述判定来确定所述装置的角速度。

16. 根据权利要求15所述的系统,其中所述处理器配置成基于所述第一组陀螺仪输出样本的平均值来确定所述陀螺仪的漂移。

17. 根据权利要求16所述的系统,其中所述处理器配置成在所述装置的所述角速度的所述确定期间使用所述陀螺仪的所述漂移。

18. 根据权利要求16所述的系统,其中:

如果所述判定是所述装置处于所述准静态平衡中,则所述装置的所述角速度的所述确定是所述第二组陀螺仪输出样本的平均值的确定;以及

如果所述判定是所述装置不处于所述准静态平衡中,则所述装置的所述角速度的所述确定包括基于所述漂移补偿所述第二组陀螺仪输出样本的所述平均值。

19. 根据权利要求15所述的系统,其中所述角速度的所述确定包括补偿在产生第一组陀螺仪输出样本期间所述惯性测量单元的温度与在产生所述第二组陀螺仪输出样本期间所述惯性测量单元的温度之间的差。

20. 根据权利要求15所述的系统,其中所述一个或多个度量包括平均值和标准偏差中的一个或两者皆有。

21. 根据权利要求15所述的系统,其中所述产生所述装置是否处于所述准静态平衡的所述判定包括确定所述第一组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量和所述第二组陀螺仪输出样本的所述一个或多个度量之间的差或绝对差。

22. 根据权利要求15所述的系统,其中所述时间间隔是毫秒量级。

用于手工电弧焊过程的三维焊炬取向的测量

[0001] 优先权要求

[0002] 本申请要求提交于2015年1月5日的题为“Measurement of Three-Dimensional Welding Torch Orientation for Manual Arc Welding Process”的美国临时专利申请62/099,859的优先权,其以引用方式并入文本:

[0003] 联邦政府资助研究

[0004] 本发明是在国家科学基金会授予的CMMI-0927707的政府支持下完成的。政府对本发明中具有一定的权利。

背景技术

[0005] 作为最广泛使用的材料连接技术之一,电弧焊已经开发和精制多年。高质量的焊接对于许多应用(诸如汽车制造、精炼厂和造船)至关重要。焊炬取向被定义为整个焊接过程中的焊炬姿势。它是最重要的焊接参数之一,以及其直接取决于焊接质量和外观。只有在调节好焊炬取向的情况下,才能保证最佳质量的焊接。不适当的焊炬操作引起各种焊接缺陷和间断,诸如焊透差、咬边、多孔和不同类型的裂纹。因此,各种团体和组织都推荐了几乎每个焊接过程的详细的焊炬取向。

[0006] 通过将方法与本公开的其余部分中提出的本方法和系统的一些方面参考附图进行比较,手工焊接的常规方法的局限性和缺点对于本领域的技术人员而言将变得显而易见。

发明内容

[0007] 提供了用于手工电弧焊过程的三维焊炬取向的测量的方法和系统,结合至少一个附图进行了充分的说明和/或描述,更完整的说明将在权利要求中提出。

附图说明

[0008] 图1示出了钨极气体保护电弧焊(GTAW)过程中不同焊接类型的焊炬取向。

[0009] 图2示出了GMAW过程中非合金钢和低合金钢中不同焊接类型的焊炬取向。

[0010] 图3A-图3C示出了示例性焊炬和IMU,IMU通过硬塑料固定件刚性地安装在焊炬手柄上。

[0011] 图4-图10示出了根据本公开的方面使用示例性焊炬和IMU进行的各种实验的结果。

具体实施方式

[0012] 不同的焊接过程可以具有各种参数,诸如焊接电流、电压、焊炬行进速度、焊丝进给速度(如果适用)和焊接焊道数目。推荐的焊炬取向操作可能会相应不同。在图1和图2中分别示出了两种广泛使用的具有焊炬取向要求的焊接过程(钨极气体保护电弧焊(GTAW)和气体金属电弧焊(GMAW))的典型推荐的焊炬姿势,如图1和图2所示。在两个图中示出了每个

过程的四种不同的装配类型。对于图1的GTAW过程,示出了用于每种装配类型的焊炬102、电极104、接缝106和焊缝108。对于图2的GMAW过程,示出了用于每种装配类型的焊炬102、接缝106、焊缝108和线112。此外,除了焊炬取向的多样性之外,对于图2中的四种装配类型采用四种不同的焊炬摆动模式110。

[0013] 在手工电弧焊过程中掌握焊炬操作是具有挑战性的。为了确保焊接质量,在沿着焊缝平稳地移动焊炬时,需要人类焊工维持推荐的焊炬姿势,可能以一个特定的摆动模式。由于焊接领域中的各种干扰,需要相应地调整焊炬以防止对焊接质量的干扰的影响。适当的焊炬取向操作的能力取决于焊工的技能水平和他/她的生理状况。主要的问题是没有经过无数小时的练习,焊工无法通过获得的经验法则来掌握焊炬调节操纵 (maneuver), 以及这使得焊工培训周期变得无法忍受的长。此外,始终需要来自焊工的必要的专心,但这不能永远被确保。

[0014] 可以使用焊炬取向测量来加速焊接训练过程。可以使用焊炬操作数据结合其它关键焊接参数来建立焊接专家表现数据库。通过数据库,可以通过在整个实践中实时检测焊炬取向将焊接受训者的操作与专家的表现进行比较,并且可以立即识别受训者的不正确或不利的操作。因此,音频或视觉指示可以在整个训练实践中作为即时表现反馈提供给受训者。已经发现焊接技术随着这种反馈而显著提高。

[0015] 检测焊炬操作也提供机会以更好地了解熟练焊工的灵巧焊接操作。考虑到熟练的焊工的焊炬操纵被检测到,可以获得与焊接质量控制有关的焊炬取向的动态。可以进一步建立专家焊接技术的数学公式,其使经验丰富的焊工比不熟练的焊工更好地提供优质焊接。将配制的技能应用到自动焊接将为下一代智能焊接机器人奠定基础,其具有与熟练人类焊工相当的抗干扰能力。另一种可能性是通过调整可以由焊接电源改变的其它焊接参数来补偿在焊炬取向操纵中的误差。

[0016] 本文公开的方法和系统的方面提供了精确的三维 (3D) 焊炬取向测量方案,其可以在实际手工电弧焊过程或焊工训练系统中便利地使用。为了说明,本公开引用了基于微型惯性测量单元 (IMU) 的示例性实现,并且使用基于四元数的无迹卡尔曼滤波器 (UKF) 和自动归零算法。UKF旨在通过在其状态向量中包含的旋转四元数来估计3D取向。本文描述的创新自动归零算法基于陀螺仪自身的输出捕获并补偿陀螺仪漂移,而不需要来自加速度计的额外信息。结合自动归零算法的UKF提供了具有合理精确度的完整的3D估计,而不需要磁力仪的帮助,在焊接过程中磁力仪的功能会受到影响。人类焊工的焊炬操作的检测是在电弧焊过程中研究他们的经验丰富的行为的基础,其已被发明人广泛研究。了解熟练和非熟练焊工的区别是核心,并且可用于加速焊机培训过程和开发下一代智能焊接机器人。通过从实际电弧焊过程捕获的焊炬运动信号的模拟和实验验证,与其它取向估计对应物相比,本文示出了取向估计的精确度的提高。

[0017] 在示例性实现中使用的IMU 306在图3A-图3C中示出。在一个示例性实现中,它是Shimmer运动传感器,但也可以使用有线或无线的其它IMU传感器而不影响算法,算法处理来自传感器的信号从而以任何方式计算取向。用于本文所描述的实验的示例IMU 306的尺寸为约53mm×32mm×19mm。它是具有无线能力的IMU,其由三轴加速度计320 (飞思卡尔MMA7260Q)、三轴陀螺仪传感器 (InvenSense 500系列) 322、微处理器 (MSP430F1611) 324和蓝牙收发器326组成。加速度计320在每个轴上具有一个滤波电容器。陀螺仪传感器322包含

三个振动元件。通过测量相应振动元件的科里奥利加速度获得每个轴上的角速率。微处理器324使用预定频率的12位模数转换器(ADC)捕获传感器数据。蓝牙收发器326将数据从IMU 306发送到计算机。根据已知技术执行传感器的校准程序。

[0018] 图3C还示出了主机设备330(例如,台式计算机、膝上型计算机、平板计算机、智能电话,服务器和/或类似物),其包括CPU/芯片组332、存储器334、收发器336和用户接口电路338。收发器336被配置成从IMU 306的收发器326接收数据。CPU/芯片组332是可操作的以用于处理来自IMU 306的数据,例如下面在本公开中描述的。来自IMU 306的数据可以在CPU/芯片组332处理之前和/或之后存储在存储器336中。可以经由用户接口电路338呈现数据的处理/分析的数据和/或结果。CPU/芯片组332也可以用于基于数据产生反馈/控制信号。可以将此类信号(例如,经由收发器336)传送到焊炬102、焊接电源,焊丝馈线和/或其它焊接设备,以向焊炬操作者提供反馈和/或自动补偿焊炬102的取向和/或运动。

[0019] 用于具有附接的IMU 306的GTAW过程的焊炬102如图3A所示。在所示的示例中,使用塑料固定件将IMU 306刚性地安装在焊炬102的尾部。在其它实现中,只要焊炬筒102的操作不受影响,其可以安装在任何地方的其它位置/构造中。在IMU 306中表示为^s(XYZ)的3D笛卡尔坐标系是其内部框架。值得注意的是,为了执行本文所描述的实验,在外部校准工具(诸如重力计)的帮助下,在包括保持焊炬102静止以使得其手柄垂直于重力方向的安装过程中,IMU306被安装成使得重力加速度方向与^sZ轴重合。坐标系^t(XYZ)是焊炬102的内部框架。它以如下方式定义:轴^tZ与焊炬102的头部方向重合,轴线^tX与轴^sX重合。通过这样做,可以通过围绕^sX轴对框架^s(XYZ)旋转表示为 θ_{st} 的角度来获得框架^t(XYZ)。

[0020] 当相对于表示为框架^E(XYZ)的绝对3D笛卡尔坐标系获得坐标系^t(XYZ)的轴取向时,确定焊炬102的取向。轴^EZ的反方向限定成与局部重力方向一致。其它两个轴的方向取决于具体的焊接应用,其具体如下。

[0021] 焊炬102取向由表示为^s \tilde{q} 的四元数所示,其中符号表示~单位四元数 $\tilde{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]$,即

$$[0022] \quad |\tilde{q}| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} = 1 \quad (1)$$

[0023] 其中 q_0 是四元数的标量部分以及 $[q_1, q_2, q_3]$ 是向量部分,并且其中,对于四元数表示,前导下标表示参考框架以及前导上标表示正在描述的框架。

[0024] IMU 306中的三轴陀螺仪322测量框架^s(XYZ)相对于框架^E(XYZ)的角速度。测量(每秒弧度 rad s^{-1})可以由等式(2)中所示的1x3行向量表示:

$$[0025] \quad {}^s\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]. \quad (2)$$

[0026] $k+1$ 时刻的四元数可以使用 k 时刻的四元数、角度测量(^s ω_k)和表示为 T_s 的时间间隔进行表示:

$$[0027] \quad {}^s\tilde{q}_{k+1} = {}^s\tilde{q}_k \otimes \exp\left(\frac{T_s}{2} \omega_k\right) \quad (3)$$

[0028] 其中 \otimes 为在等式(4)中定义的四元数乘积,其中 $a = [a_1 a_2 a_3 a_4]$ 以及 $b = [b_1 b_2 b_3 b_4]$ 。Exp(.)表示等式(5)中定义的四元数指数。

$$[0029] \quad a \otimes b = \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 \\ a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 + a_4 b_1 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$[0030] \quad \exp(v) \triangleq \left[\cos(\|v\|), \frac{v}{\|v\|} \sin(\|v\|) \right] \quad (5)$$

[0031] 其中 v 表示 1×3 行向量。焊炬取向 ${}^R\hat{q}$ 可以由等式(6)进行计算。

$$[0032] \quad {}^R\hat{q} = {}^R\hat{q} \otimes \exp(\theta_w, 0, 0) \quad (6)$$

[0033] IMU306中的陀螺仪322和加速度计320分别测量传感器的角速度和加速度。除了真值 ${}^s\omega_{\text{true}}$ 和 ${}^s a_{\text{true}}$ 以外,影响IMU 306测量的几个主要误差源包括偏置、比例因子不稳定、轴的非正交性和测量噪声。为此,IMU 306测量表示在等式(7)和(8)中:

$$[0034] \quad {}^s\omega = S_\omega {}^s\omega_{\text{true}} + T_\omega {}^s\omega_{\text{true}} + b_\omega + v_\omega \quad (7)$$

$$[0035] \quad {}^s a = S_a {}^s a_{\text{true}} + T_a {}^s a_{\text{true}} + b_a + v_a \quad (8)$$

[0036] 其中 S_ω 和 S_a 是比例因子矩阵; T_ω 和 T_a 是非正交因子矩阵; b_ω 和 b_a 是偏置;以及 v_ω 和 v_a 是测量噪声。这是一个简化的传感器模型。未考虑一些较小的误差源,诸如交叉敏感度和重力灵敏度,其它实施例可能考虑了这些误差源。

[0037] 测量噪声 v_ω 和 v_a 通常被认为是不相关的高斯白噪声,分别具有零均值和 3×3 协方差矩阵 ${}^R\sigma_\omega^2 I_{3 \times 3}$ 和 ${}^R\sigma_a^2 I_{3 \times 3}$ 。传感器模型R的协方差矩阵是

$$[0038] \quad R = \begin{bmatrix} {}^R\sigma_\omega^2 I_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^R\sigma_a^2 I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0039] 真正的加速度测量包括两个组分:传感器加速度和重力加速度,由等式(10)表示:

$$[0040] \quad {}^s a_{\text{true}} = {}^s a_{\text{sensor}} + {}^s g \quad (10)$$

[0041] 其中 ${}^s g$ 是传感器框架中的重力加速度,其可以使用等式(11)获得:

$$[0042] \quad {}^s g = {}^R\hat{q} \otimes [0, {}^R g] \otimes {}^R\hat{q}^* \quad (11)$$

[0043] 考虑到熟练的焊工具有良好的动机性,在整个电弧焊过程中焊炬102应该以不明显的加速度(包括“减速”)沿着接缝106平稳地移动。因此,在示例性实现中, ${}^s a_{\text{sensor}}$ 与重力加速度相比是微不足道的,因此可以被认为是干扰。此后,等式(10)可以由等式(12)表示:

$$[0044] \quad {}^s a_{\text{true}} \approx {}^s g \quad (12)$$

[0045] 归一化重力可用于消除由局部重力差引起的测量误差。

[0046] 方程(7)和(8)中的偏置和比例因子取决于IMU 302和工作场地的非理想性。陀螺仪322的典型偏置为 $0.017-0.17 \text{ rad h}^{-1}$,以及加速度偏差约为站术等级的 $100-1000 \text{ pg}$ 。特别地,环境温度显著影响陀螺仪322的偏置。在示例性实现中,在作为强热源的焊接电弧附近使用IMU306。因此,陀螺仪322的偏置在整个电弧焊过程中可能不是恒定的。在本公开的示例性实现中,使用自动归零算法来补偿陀螺仪322在线的漂移,以保护温度漂移变化对估计的精确度的影响。

[0047] 温度对加速度计320的偏置的影响要小得多。加速度计320的在线校准可能需要加

速度计320的向量输出,以保持几个不同取向的准静态平衡。也就是说,要求加速度计320不以超过确定的阈值加速或减速。阈值可以设置为大于或等于0的任何值。在一个示例性实现中,当加速度计320处于准静态平衡时,加速度计320的向量输出可以低于确定的阈值。然而,在一个典型的应用中,如图1和图2所示,在整个电弧焊过程中焊炬102应该保持在一定的取向。因此,对于在线校准将不会有足够的取向。因此,在一个示例性实现中,假定加速度计320的偏置是恒定的,并且在使用之前通过校准进行补偿。

[0048] 已知IMU306的比例因子漂移会将测量精确度影响到比偏置漂移更小的程度。温度漂移变化也可忽略不计。因此,在一个示例性实现中,在整个焊接过程中,比例因子被认为围绕其平均值经受小的变化。它们的标称值可以在使用前通过传感器校准来确定。

[0049] 捕获陀螺仪322的漂移可能需要保持陀螺仪322不旋转。基本原理称为零姿态更新(ZAU),也称为自动归零,即,当陀螺仪322不发生旋转时,其输出可被认为是由偏置和其它误差源引起的漂移。然后可以定期捕获和补偿漂移。在一个示例性实现中,使用新的自动归零算法,其中使用来自陀螺仪自身输出的信息来检测准静态平衡状态。

[0050] 当IMU 306设置为静止时,在小的时间间隔内获得的陀螺仪322的输出的平均值和偏差可以用于确定是否处于准静态平衡。这两个变量由以下等式定义

$$[0051] \quad \mu_s = \sum_{k=1}^M \omega_k / M \quad (13)$$

$$[0052] \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (\omega_k - \mu_s) * (\omega_k - \mu_s)'}{M}} \quad (14)$$

[0053] 其中M是样本数。为了记录用于计算 μ_s 和 σ_s 的数据,可以进行准静态平衡数据采集过程,其中IMU 306设置成静止在室温(约23°C)中。在从陀螺仪322记录有效数据之前,允许IMU36加电几分钟,直到其达到热稳定性。

[0054] 对于由陀螺仪322记录的任意角速度 ω_i ,相应的平均值和偏差在等式(15)和(16)中定义,

$$[0055] \quad \mu(i) = \sum_{k=1}^N \omega_k / N \quad (15)$$

$$[0056] \quad \sigma(i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\omega_k - \mu(i)) * (\omega_k - \mu(i))'}{N}} \quad (16)$$

[0057] 其中 $i > N$,以及N是在 ω_i 之前的小间隔 T_{au} 中收集的陀螺仪输出的样本数。在一个示例性实现中, $T_{au} = 1s$ 。

[0058] 如果陀螺仪322在间隔 T_{au} 内的输出的平均值和偏差与 μ_s 和 σ_s 接近(在确定的阈值内),则认为焊炬102和IMU 306处于准静态平衡。检测准静态平衡的其它方法当然是可能的。根据ZAU原理,平均值 $\mu(i)$ 可因此被认为是漂移。在一个示例性实现中,由于热延迟,由焊接电弧引起的可能的环境温度变化是处于相对较低的速率。因此,可以使用在准静态平衡间隔中获取的漂移来补偿来自准静态平衡间隔的时间附近的陀螺仪322的数据。如果IMU 306处于动态周期 $\mu(i)$ 或 $\sigma(i)$ (其远大于 μ_s 和 σ_s),则补偿可以由最近的准静态平衡间隔的平均值来实现。

[0059] 此外,如上所述,陀螺仪322的漂移可能对温度敏感。因此,在一个示例性实现中,自动归零算法中包括两个热系数 p_μ 和 p_σ ,以解决使用焊炬102和IMU 306的环境与其中进行准静态平衡实验的一个环境之间的温度差。对于下面讨论的模拟,将它们设置为1,因为在其上进行准静态平衡实验的温度与在其中进行模拟的温度大致相同。可以基于估计结果和/或经验选择来预先设定系数并给出合理的值。

[0060] 因此,如果存在

$$[0061] \quad \mu(i)^2 \leq p_\mu \mu_c^2 \quad \text{and} \quad \sigma(i) \leq p_\sigma \sigma_c \quad (17)$$

[0062] 那么,焊炬102和IMU 306被认为处于准静态平衡,并且 $\mu(i)$ 被称为有效漂移。

[0063] 因此,在一个示例性实现中的自动归零算法可以表示为

$$[0064] \quad {}^s\omega_i = \begin{cases} {}^s\omega_i - \mu_i & i \leq N \\ {}^s\omega_i - \mu(i) & \text{WIMU is static, } i > N \\ {}^s\omega_i - \mu(\xi) & \text{WIMU is dynamic, } i > N \end{cases} \quad (18)$$

[0065] 其中 $\mu(\xi)$ 是 ${}^s\omega_i$ 的最近的有效漂移, $\xi < i$ 。

[0066] 使用上述自动归零算法,不需要一些外部传感器的数据来补偿漂移对取向估计的影响。下面将对算法的有效性进行评估。

[0067] 在一个示例性实现中,UKF的状态向量由焊炬取向四元数和角速度组成。

$$[0068] \quad \mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} {}^s\mathbf{q}_k \\ {}^s\omega_k \end{bmatrix} \quad (19)$$

[0069] 使用状态向量,传感器模型(等式(7)和(8))可以重写成如等式(20)所示:

$$[0070] \quad \mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k) \quad (20)$$

[0071] 其中 $\mathbf{z}_{k+1} = [{}^s\omega_{k+1}, {}^s\mathbf{a}_{k+1}]$, and $\mathbf{v}_k = [\mathbf{v}_w, \mathbf{v}_a]$ 。

[0072] 由状态向量表示的过程模型是

$$[0073] \quad \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k) = \begin{bmatrix} {}^s\mathbf{q}_k \otimes \exp(\omega_k) \otimes \exp(\mathbf{w}_q), {}^s\omega_k + \mathbf{w}_\omega \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0074] 其中 $\mathbf{w}_k = [\mathbf{w}_q, \mathbf{w}_\omega]$ 是表示为 \mathbf{Q}_k 的协方差矩阵的过程噪声, $\exp(\omega_k)$ 是在第k个采样周期中的旋转的增量,以及 $\exp(\mathbf{w}_q)$ 是由 \mathbf{w}_q (其为过程噪声的四元数分量)引起的过程不确定性。

[0075] 在示例性实现中,因为需要将焊炬102保持在推荐取向上并对可能的干扰进行小调整,预期角速度将相当小。因此,角速度可以被建模为过程模型中的随机游走。

[0076] 由于过程模型(等式(21))和传感器模型的非线性特征,应用了UKF方法。UKF算法总结如下。

[0077] 给定在k-1时刻处的估计状态向量 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 及其协方差 \mathbf{P}_{k-1} ,由等式(22)定义辅助向量集 $\{\psi_i\}$:

$$[0078] \quad \psi_i = \begin{cases} (\sqrt{(n+\lambda) \cdot (\mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q})})_i & i = 1, \dots, n \\ -(\sqrt{(n+\lambda) \cdot (\mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q})})_{(i-n)} & i = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (22)$$

[0079] 其中 $(\sqrt{(n+\lambda) \cdot (\mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q})})_i$ 是矩阵平方根的第i行,以及 $\lambda = \alpha^2(n+k) - n$,其中 α 和k是两个比例参数。一个值得注意的微小细节是协方差 \mathbf{P}_{k-1} 的维数为 6×6 ,因为状态向量的

自由度 (DOF) 为6 (单位四元数约束减少了一个DOF)。因此, ψ_{iS} 是1x6向量。

[0080] UKF通过使用最小的一组采样点 (即 σ 点) 来捕捉平均值和协方差估计, 从而解决非线性系统的近似。 σ 点集合 $\{(X_{k-1})_i\}$ 由以下等式定义

$$[0081] \quad (X_{k-1})_i = \hat{x}_{k-1} = [\hat{q}_{k-1}, \hat{\omega}_{k-1}] \quad (23)$$

as $i = 0$, and

$$[0082] \quad (X_{k-1})_i = \hat{x}_{k-1} + \psi_i = [\hat{q}_{k-1} \otimes \exp(\psi_{i,q}), \hat{\omega}_{k-1} + \psi_{i,\omega}] \quad (24)$$

[0083] 当 $i = 1, \dots, 2n$, 以及 $\psi_i = [\psi_i|_q, \psi_i|_\omega]$, 其中 $\psi_i|_q$ 是对应于四元数部分的 ψ_i 的前三个元素, 以及 $\psi_i|_\omega$ 涉及角速度。状态向量 \hat{x}_{k-1} 的长度为7, 而 ψ_i 为六元素向量。因此, 等式 (24) 使用等式 (5) 中的四元数指数对 $\psi_i|_q$ 执行矢量到四元数转换。

[0084] 在获得了 $\{(X_{k-1})_i\}$ 的 σ 点之后, 使用过程模型以在时间上提前投射每个点。传播结果如等式 (25) 所示, 并因此在等式 (26) 中得到先验状态估计:

$$[0085] \quad (x_k)_i = f((x_{k-1})_i, 0, 0) \quad \text{for } i = 0, \dots, 2n \quad (25)$$

$$[0086] \quad \hat{x}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} (x_k)_i \quad (26)$$

[0087] 其中权重 $W_i^{(m)}$ 由下面的等式定义

$$[0088] \quad W_i^{(m)} = \begin{cases} \lambda/(n+\lambda) & i=0 \\ \lambda/(2(n+\lambda)) & i=1, \dots, 2n. \end{cases} \quad (27)$$

[0089] $(X_k)_i$ 的协方差是

$$[0090] \quad P_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} [(x_k)_i - \hat{x}_k] [(x_k)_i - \hat{x}_k]^T \quad (28)$$

[0091] 其中权重 $W_i^{(o)}$ 在等式 (29) 中定义, 以及 β 是用于结合关于状态向量 x 的分布的先验知识的比例参数。应该注意, P_k^- 是6/6矩阵, 而 $(X_k)_i$ 和 \hat{x}_k^- 是七元素向量。因此, 在等式的右侧进行转换, 以将四元数部分转换为三元素旋转向量。这种四元数到旋转的转换是等式 (5) 的反向过程:

$$[0092] \quad W_i^{(o)} = \begin{cases} \lambda/(n+\lambda) + (1-\alpha^2 + \beta) & i=0 \\ \lambda/(2(n+\lambda)) & i=1, \dots, 2n. \end{cases} \quad (29)$$

[0093] 传感器模型中的投影集 $\{(X_k)_i\}$ 的结果表示为

$$[0094] \quad (y_k)_i = h((x_k)_i, 0, 0) \quad \text{for } i = 0, \dots, 2n. \quad (30)$$

[0095] 因此, 可以在等式 (31) 中定义测量估计:

$$[0096] \quad \hat{y}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} (y_k)_i. \quad (31)$$

[0097] 使用下面等式计算后验状态估计:

$$[0098] \quad \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{y}_k) \quad (32)$$

[0099] 其中 z_k 是来自 IMU 306 的测量向量, 以及 K_k 是由下式定义的卡尔曼增益

[0100]
$$K_k = P_{k|k} P_{k|k}^{-1} \quad (33)$$

[0101] 互相关矩阵 $P_{x_k z_k}$ 和测量估计协方差 $P_{z_k z_k}$ 分别在等式 (34) 和 (35) 中表示:

[0102]
$$P_{k|k} = \sum_{i=0}^k W_i^{(k)} [(x_k) - \hat{x}_k]^T [(y_k) - \hat{z}_k] \quad (34)$$

[0103]
$$P_{k|k} = \sum_{i=0}^k W_i^{(k)} [(y_k) - \hat{z}_k]^T [(y_k) - \hat{z}_k] + R \quad (35)$$

[0104] 对等式 (34) 的第二个括号中的项进行四元数到旋转的转换, 以确保有效的互相关矩阵。估计状态协方差在 k 时刻通过下式更新

[0105]
$$P_k = P_k^- - K_k P_{k|k} K_k^T \quad (36)$$

[0106] 在一个示例性实现中, 对于成功的 UKF 表现, 需要首先确定以下参数: Q_k, R, a, β 和 k 。比例参数 a, β 和 k 可以经验性地预先设定, 并根据滤波器测试结果给出合理的值。 ${}^R \sigma_a^2 1_{3 \times 3}$ 和 ${}^R \sigma_a^2 1_{3 \times 3}$ 在传感器静止时考虑传感器信号的谱密度。

[0107] 过程噪声协方差 Q_k 可以由下式确定

[0108]
$$Q_k = \Phi_s \int_0^{\Delta t} \Phi(\tau) Q' \Phi^T(\tau) d\tau \quad (37)$$

[0109] 其中 Φ_s 是比例参数, $\Phi(\tau)$ 是通过采用系统动态矩阵的泰勒级数展开计算的基本矩阵的近似, 以及 Q' 是连续过程噪声矩阵。协方差矩阵 Q' 表示为

[0110]
$$Q' = \begin{bmatrix} \Sigma_q & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_\omega \end{bmatrix} \quad (38)$$

[0111] 其中 $\Sigma_q = {}^R \sigma_q^2 1_{3 \times 3}$ 和 $\Sigma_\omega = {}^R \sigma_\omega^2 1_{3 \times 3}$ 分别是过程噪声的四元数部分角速度部分的协方差矩阵, 在示例性实现中, 其被假定为不相关的零均值白噪声。

[0112] 模拟和实验

[0113] 使用上面详细描述 IMU3010 来测试取向估计方案。记录原始数据, 将其传输到桌面, 并根据本公开的方面进行处理。焊接机器人 (Universal Robot UR 5) 用于提供焊炬取向的参考测量。要做到这一点, 焊炬 (在焊接实验中) 或 IMU 306 (在模拟中) 刚性安装在机器人工具中心, 机器人前臂上的平面的中心。使用机器人的反馈, 通过导入的附带软件计算工具中心的取向。通过二阶低通巴特沃斯型滤波器 (截止频率: 15Hz) 对获得的参考取向进行滤波。进行初始校准以确定用于将工具中心取向转换为焊炬 102 和 IMU 306 取向的四元数。通过将其与参考测量进行比较来评估示例性实现的表现。

[0114] 焊接机器人提供的参考取向的精确度取决于机器人工具中心的取向测量精确度和机器人 IMU 取向校准的精确度。可以使用由机器人制造商提供的数据来估计机器人的取向测量误差。机器人的重复性为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。机器人工具中心围绕其旋转的机器人的最短前臂约为 89mm。因此, 其最大取向误差约为 0.06° , 这作为示例性实现的测量参考是可接受的。

[0115] 定义参考 3D 笛卡尔坐标系^E (XYZ) 以证明有效的取向测量: z 轴定义如上; x 轴和 y 轴由右手规则任意定义。IMU 306 安装在机器人工具中心, 使得其内部坐标系^S (XYZ) 与初始位

置处的框架^E (XYZ) 相同。

[0116] 为了模拟人类的手的行为,焊接机器人被设置在教学模式中,使得机器人工具中心可以围绕其内部框架的三个轴线手动地且平稳地旋转。在表示为 D_i^s 的模拟中构造了四个数据集,其中 $i=1,2,3,4$ 。为了分别在三维中评估示例性实现的表现,IMU 306在每个模拟中围绕一个轴旋转。因此,对于 D_1^s 到 D_4^s ,机器人工具中心(和IMU 306)分别围绕x轴,y轴和z轴旋转。三个数据集中的旋转顺序相同,即第一次旋转 90° (正方向表示从一个轴的反方向到正方向观察的顺时针旋转),返回到初始位置,然后旋转 -30° ,并重新回到初始位置。在每个阶段(在 90° 位置、 -30° 位置和初始位置),机器人工具中心保持静止几秒钟。应注意的是,由于机器人工具中心被手动旋转,所以固定相位可能不是精确地 90° 、 -30° 或 0° 。然而,它不影响模拟程序或估计精确度。

[0117] 对于 D_i^s ,机器人工具中心以上述旋转顺序围绕三个轴一起旋转。由于人类固有的神经时延,机器人工具中心被认为比人类的手更稳定。为此,通过将 D_i^s 中的两个随机高斯噪声分别引入到陀螺仪322和加速度计320的数据中以进一步人工构建数据集 D_{i+n}^s ,从而模拟人类的手的不稳定性。在 D_i^s 中的陀螺仪322和加速度计320的数据的噪声的方差为 5×10^{-2} 和 5×10^{-1} 。

[0118] 研究了两个UKF实现,此后称为方法A和方法B。方法A结合了上述自动归零算法,而方法B没有。另外还包括两个梯形数值积分方法作为两种比较:方法C采用了上述自动归零算法,而方法D没有。以三种不同的采样率测试了四种方法:256Hz、128Hz和51.2Hz。对每个条件进行了六次重复测试,包括方法和采样率。

[0119] 在示例性实现中采用的表现指标是取向程度的均方根误差(RMSE _{θ}),其由下式定义

$$[0120] \quad \text{RMSE}_\theta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (\Delta\theta_i)^2} \quad (39)$$

[0121] 其中n是要评估的数据集的样本编号:

$$[0122] \quad \Delta\theta_i = \frac{2 * 180}{\pi} \arccos((q_{ik} \otimes q_{ek}^*)_0) \quad (40)$$

[0123] 其中 q_{ik} 和 q_{ek} 是真值参考和估计的四元数。除了RMSE _{θ} 之外,还采用三轴旋转欧拉角的RMSE_s,分别表示为RMSE_x,MRSE_y和RMSE_z。

[0124] 从焊接实验中获得了由 D_1^s 和 D_2^s 表示的割炬取向的两个数据集。从包含与图1中的构造顺序依次对应的四种类型的焊接装配的GTAW实验中收集数据集 D_1^s ,以及从包括如图2所示的焊接类型的GMAW实验获得数据集 D_2^s 。此外,通过将最后一节中提到的相同噪声分别引入 D_1^s 和 D_2^s ,分别人工构建两个数据集 D_{1+n}^s 和 D_{2+n}^s 。测试方法是方法A,其为模拟试验中的比赛获胜者。对每种焊接类型进行了六次重复试验。

[0125] 表1.GTAW实验的主要焊接条件。

	焊接参数	条件
	焊接电流(A)	60
	焊接速度(ms-l)	1~2 (由焊工改变)
	钨尖至工件距离(mm)	2~5 (由焊工改变)
[0126]	电极延伸(mm)	3
	电极类型	EWCe-2
	电极直径(mm)	2.38
	电极尖端几何形状(deg)	30
	保护气体	氩气 100%
	保护气体流量(L min-1)	11.8
	材料	2 毫米厚 304L 片

[0127] 为了构建数据集,具有附接的IMU 306的焊炬102(如图3A所示)被安装在被设置在教学模式中的焊接机器人的工具中心上。要求新手焊工握住机器人前臂并执行上述实验。每种焊接类型持续约30秒。焊工休息并在每两次焊接试验之间将焊炬102设置为初始姿势。GTAW实验的焊接条件列于表1中。实验中不使用填充金属。对于GMAW实验,不仅需要保持焊炬方向,而且需要遵循特定的焊炬摆动模式。在实验中,由于新手焊工的焊接技术有限,电弧没有开始,即焊炬102牢固地保持在焊缝106的上方并在没有建立电弧的情况下沿着焊缝106被平稳地拖动。实验数据传送到主计算机,并使用Matlab R2011离线处理。

[0128] 为实验数据定义了参考3D笛卡尔坐标系 E' (XYZ)。 E' Z的反方向与重力方向重合。 E' Y的正方向是沿焊缝的焊接方向。然后使用右手规则确定轴 E' X。在实验中,焊炬和机器人之间的空间关系被仔细校准。在初始姿态下,焊炬头被设定为使得 E' (XYZ)中的轴线方向分别与 t (XYZ)中的那些方向重合。

[0129] UKF的初始参数列在表2中。

[0130] 表2. 方法A和方法B的UKF参数的初始化。

		$Q\sigma_q$	$Q\sigma_\omega$	$R\sigma_\omega$	$R\sigma_\delta$	a	β	k
[0131]	方法 A	0.18	0.08	0.5	0.2	1.4	1.0	0
	方法 B	0.27	0.18	1.2	0.4	1.0	0	3.0

[0132] 当IMU 306在室温条件下静止时,陀螺仪322的输出的平均值和标准偏差用等式(41)和(42)测量。当进行模拟时,系数 p_μ 和 p_σ 被选为1.0:

$$[0133] \quad \mu_s = [8.50 \times 10^{-3} \quad 1.56 \times 10^{-2} \quad 4.70 \times 10^{-3}] \quad (41)$$

$$[0134] \quad \sigma_s = [1.18 \times 10^{-4} \quad 1.47 \times 10^{-4} \quad 9.87 \times 10^{-5}]. \quad (42)$$

[0135] RMSE θ 的所得估计的统计列在表3中。在表3中,通过RMSE θ 的平均值和标准偏差将方法A的估计表现与其它三种对应算法进行比较。

[0136] 表3. 通过蒙特卡罗表现试验过程中不同的估计方法获得的形式为平均值 \pm 标准偏差的取向估计(RMSE θ)。在数据组 D_{ann}^s 中人工地引入陀螺仪322的附加距离,和加速度。

[0137]

	D_{12}^s	D_2^s	D_{23}^s	D_{31}^s	D_{123}^s
$f_X = 256 \text{ Hz}$					
A	0.53±0.11	0.47±0.14	0.91±0.20	0.98±0.25	1.35±0.34
B	2.56±0.17	2.74±0.55	1.50±0.48	2.67±0.41	3.02±0.58
C	4.91±0.54	5.11±1.36	6.43±0.81	7.48±0.67	7.85±0.98
D	25.97±2.58	19.18±1.57	21.72±2.27	30.14±3.49	32.56±3.98
$f_X = 128 \text{ Hz}$					
A	0.50±0.13	0.40±0.16	0.94±0.29	1.01±0.20	1.28±0.32
B	3.52±0.93	2.97±0.73	2.25±0.47	2.21±0.35	2.45±0.47
C	5.27±1.18	6.12±1.57	5.73±0.36	7.14±0.58	8.01±0.79
D	28.39±5.17	23.59±4.18	29.42±1.31	31.30±4.78	41.44±5.36
$f_X = 51.2 \text{ Hz}$					
A	0.67±0.03	0.52±0.08	1.57±0.32	2.59±0.24	2.81±0.22
B	2.21±0.28	3.74±0.42	3.17±0.52	3.75±0.27	4.11±0.31
C	5.45±1.71	7.94±3.84	8.49±3.67	9.42±3.65	9.84±4.22
D	19.64±3.82	18.12±2.57	23.44±5.12	25.14±4.25	27.51±4.44

[0138] 表4示出了三个单独轴的取向估计结果 ($\text{RMSE}_s [^\circ]$)。评估数据集分别为 D_{12}^s 、 D_2^s 和 D_{31}^s 。

[0139] 表4. 通过在每个模拟的六次重复试验过程中的不同的估计方法获得的形式为平均值±偏差的取向估计 ($\text{RMSE}_\theta (^\circ)$)。

	D_1^s	D_2^s	D_3^s	
	$f_x=256\text{ Hz}$	RMSE _x	RMSE _y	RMSE _z
	A	0.23 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.49 ± 0.04
	B	0.26 ± 0.05	0.46 ± 0.29	1.14 ± 0.37
	C	4.77 ± 0.58	4.60 ± 1.25	4.97 ± 0.71
	D	12.86 ± 2.55	10.62 ± 1.30	13.42 ± 2.10
[0140]	$f_x = 128\text{ Hz}$			
	A	0.32 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.76 ± 0.14
	B	0.34 ± 0.02	0.70 ± 0.03	1.72 ± 0.31
	C	4.69 ± 0.69	4.34 ± 0.94	5.16 ± 0.23
	D	15.39 ± 2.58	10.86 ± 2.46	20.34 ± 1.51
	$f_x = 51.2\text{ Hz}$			
	A	0.60 ± 0.02	0.46 ± 0.05	0.81 ± 0.18
	B	0.62 ± 0.02	0.49 ± 0.05	2.24 ± 0.41
	C	4.99 ± 1.39	6.68 ± 3.21	7.16 ± 2.33
	D	10.97 ± 8.22	9.95 ± 1.64	24.79 ± 3.10

[0141] 图4和图5示出了在模拟试验中测量的欧拉角的时间函数,并且参考测量来自于焊接机器人。特别地,图4示出了分别使用数据集 D_1^s 、 D_2^s 和 D_3^s 的x轴、y轴和z轴的取向的估计。在图5中示出了3D取向估计,其使用具有数据集 D_4^s 的四种算法获得。图6示出了使用与图5对应的数据集通过方法A获得的四元数时间函数。应该注意的是,每个图仅示出了相应模拟条件的六次试验的估计结果之一。

[0142] 表3和表4示出了慢速焊炬运动的估计结果,其中角速率约为 3°s^{-1} 。表5中示出了角速率大于 5°s^{-1} 的焊炬运动的取向估计结果。

[0143] 表5.通过方法A获得的形式为平均值±偏差的动态取向估计[RMSE_θ](°)。角速率大于 5°

	$f_x = 51.2$	$f_x = 128$	$f_x = 256$	
	D_1^s	1.40 ± 0.06	0.89 ± 0.18	0.61 ± 0.08
	D_2^s	1.74 ± 0.07	0.91 ± 0.19	0.54 ± 0.11
[0144]	D_3^s	1.89 ± 0.38	1.25 ± 0.35	1.10 ± 0.38
	D_4^s	3.28 ± 0.29	1.62 ± 0.35	1.25 ± 0.26
	D_{4+n}^s	3.56 ± 0.45	1.94 ± 0.41	1.55 ± 0.35

[0145] 可以从模拟结果中找到方法A产生最佳表现的结果。选择进行实验的采样率为128Hz,因为它提供了估计精确度和计算负载之间的良好折衷。表6示出了从由两个焊接过程(GTAW和GMAW)组成的上述实验中获得的估计RMSE_θ的平均值和标准偏差,每个焊接过程包括四个焊接装配。

[0146] 表6.通过不同的数据集使用采样率 $f_s = 128\text{Hz}$ 的方法A产生的取向估计[RMSE_θ](°)。四种类型的焊接考虑了在图1中的(用于数据集 D_1^s 和 D_{1+n}^s)和在图2中(对于数据组 D_2^s 和

D_{2+n}^c)的那些

	类型 A	类型 B	类型 C	类型 D
[0147] D_1^c	2.59 ± 0.37	3.10 ± 0.44	2.67 ± 0.46	2.78 ± 0.42
D_2^c	2.37 ± 0.42	2.11 ± 0.59	2.14 ± 0.35	3.40 ± 0.54
D_{1+n}^c	3.74 ± 0.51	3.46 ± 0.45	3.44 ± 0.45	3.32 ± 0.48
D_{2+n}^c	4.04 ± 0.31	3.57 ± 0.41	3.84 ± 0.39	3.62 ± 0.51

[0148] 由于焊接实验平均持续时间仅为40秒左右,因此与在准静态平衡时IMU306进行漂移测试时的环境温度相比,环境温度没有显著变化。因此,热系数 p_μ 和 p_σ 调节在1.2到2.1之间(在GMAW实验中它们被设置为1.0)。

[0149] 图7-图10示出了欧拉角中的典型取向估计结果。特别地,图7示出了对应于图1(B)所示的焊接过程的具有搭焊接头的一个GTAW过程中的估计结果。焊枪102的初始姿态在所有三个轴上应为 0° 。根据相关的焊接类型(图1(B)),焊工预计将焊炬的3D取向保持在 $[20^\circ, -20^\circ, CR]$,其中CR表示“定制相关”,即该特定轴的取向取决于焊工的个人操作习惯。在图7中可以看出,如图1(B)所示,焊炬取向偏离推荐的焊炬姿势约 5° 。这是正常的,因为焊工是没有掌握焊炬操作的新手焊工。在图2(A)-图2(C)中分别示出焊接过程,其结果如图8-图10所示。三种焊接类型的推荐的焊炬姿势分别为 $[10^\circ \sim 20^\circ, -45^\circ, CR]$, $[80^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ 和 $[100^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ 。类似地,在所得图中观察到相应建议的取向偏差。然而,这些偏差不会影响估计精确度。

[0150] 在方法A中,自动归零算法被纳入过程中以补偿在模拟和焊接实验期间可能的时变陀螺漂移;而对于加速度计的在线自校准,需要多种姿势。然而,在整个焊接实验期间,期望焊炬取向将保持在推荐姿态。因此,在加速度计进行校准的单个实验中,没有足够的姿势。

[0151] 发现表2中列出的UKF参数初始化在运行大量模拟或实验后仍能工作良好,即使存在并入的噪声。使用前对IMU 306进行了校准。此外,自动归零算法也被纳入方法A以补偿陀螺漂移。因此,方法A选择的测量噪声和过程噪声的协方差相对较小;而由于没有自动归零算法,方法B中的协方差选择成大于A中的协方差。可以增加过程噪声以补偿不准确建模的干扰并提高过滤器的跟踪能力。

[0152] 表3和表4中报告的结果表明,UKF和自动归零算法的组合给出了最佳表现。 x 轴和 y 轴取向估计的结果在精确度上是可比的。然而, z 轴估计示出了相对较差的精确度。有争议的是,由于加速度计320不能在 z 轴上提供焊炬的取向信息,所以UKF中的估计仅依赖于陀螺仪322输出本身的精确度。因此,在没有来自加速度数据的帮助的情况下,性能相对较差。通过比较方法A和方法B的表现,可以在表4中找到另一个有趣的观察结果:由两种方法产生的RMSE x_s 和RMSE y_s 相当,但是使用方法A获得的相应的RMSE θ 显著更小。从这个观察结果可以得出结论:(1)RMSE e 的主要来源是来自对 z 轴(航向)的估计;(2)通过应用本文描述的自动归零算法来补偿陀螺仪漂移,可以获得估计精确度的显著提高。

[0153] 在另一示例性实现中,来自磁性传感器328的数据被融合到UKF中以提高 z 轴的估计精确度。然而,存在来自焊接机器人和焊接电弧的强磁干扰,对维持取向估计的精确度构成挑战。幸运的是,即使没有额外的磁性传感器328,表3和表6中报告的3D估计误差也是可接

受的。此外,在其中仅应用加速度计和陀螺仪的实现中,与在其中添加磁力仪的实现相比,降低了成本/复杂性。

[0154] 在将噪声注入到陀螺仪数据和加速度数据中之后,在表3和表6中观察到估计精确度的退化。自动归零算法能够补偿陀螺仪数据中的噪声。然而,受污染的加速度数据包含重力和由注入噪声引起的伪加速度,而IMU 306的加速度被认为是传感器模型中的干扰(等式(8))。因此,传感器模型因加速度的存在而趋向于不太准确,并且其导致退化的取向估计。类似的结果可以在表5中找到。当焊炬运动变得更快时,加速度计更有可能检测到焊炬运动的加速度。因此估计精确度退化。

[0155] 在执行的分析的限内,提高采样率确实提高了估计精确度,但其效果并不明显。与EKF不同,EKF通常需要高采样率来避免可能的滤波器不稳定,UKF没有这样的稳定性问题。提高采样率是对电池供电的IMU 306的巨大的计算和能量假设负担。因此,在焊接实验中采样率设置为128 Hz。

[0156] 可以发现,一些推荐的焊炬取向不需要z轴姿势的规范,诸如图1中焊接类型的规范。这是因为在一些焊接过程中,z轴上的焊炬姿势与焊接质量不一定是必需有关的。另一方面,对于像图2所示的焊接类型,推荐焊接类型使用合适的z轴焊炬姿势以便执行合格的焊接。此外,在第1节所述的应用中,准确的全3D取向估计是非常有用的。

[0157] 通过比较图7和图8-图10,可以发现焊炬的摆动运动对焊炬102取向的影响:当手焊炬摆动运动增加时,在焊炬取向曲线上观察到更多的纹波。然而,由于摆动运动,在取向估计中没有观察到产生的额外误差。

[0158] 本文提供了用于测量3D焊炬取向的方法和系统,其可以方便地适应于手工电弧焊过程或焊工训练系统,如本文中描述的。示例性实现包括通过自动归零算法并入的基于四元数的UKF。UKF旨在使用具有三轴陀螺仪和三轴加速度计的微型IMU 306来估计3D焊炬取向。自动归零算法用作在线校准程序来补偿陀螺仪漂移,这已经被验证可以显著提高三维的估计精确度,特别是在航向估计中。在一个示例性实现中,本文描述的方法和系统提供了精确的取向估计,而无需额外的磁力计的帮助。通过模拟和焊接实验验证了估计的精确度。统计显示,示例性实现中的估计误差大约为 3° 。

[0159] 根据本公开的一个示例性实现,系统(例如,330)从固定到装置(例如,工具(诸如焊炬102、切割焊炬、锯等等)或工具附件(诸如手套))的惯性测量单元(例如,306)接收信号,并分析信号以检测装置是否处于准静态平衡。系统基于在焊炬处于准静态平衡期间(例如,当操作者有意地暂停的延长时段期间和/或在毫秒量级的无意间/瞬间间隔期间)接收到的信号的一部分产生重力加速度向量。系统可以基于重力加速度向量来执行实时(例如,在其中装置是焊炬或切割焊炬的焊接或切割操作期间)校准惯性测量单元。实时校准的表现可以包括确定惯性测量单元的坐标系的轴(例如,图3B)与重力加速度向量之间的角度。实时校准的表现可以包括确定惯性测量系统的陀螺仪的初始角度(例如, θ_{st})。执行实时校准可以包括确定角漂移的速率。系统可以基于信号并且基于在实时校准期间确定的值来实时地确定惯性测量单元的取向。系统可以使用无迹卡尔曼滤波器处理信号。

[0160] 根据本公开的一个示例性实现,系统(例如,330)包括处理器(例如,323)和收发器(例如,336)。在其中已知装置处于准静态平衡的时间间隔期间(例如,当操作者有意地暂停的延长时段期间和/或在毫秒量级的无意间/瞬间间隔期间),收发器从固定到装置(例如,

工具(诸如焊炬102、切割焊炬、锯等等)或工具附件(诸如手套))上的惯性测量单元(例如306)接收第一组陀螺仪输出样本,以及处理器计算用于第一组陀螺仪输出样本的一个或更多的度量。在操作装置期间(例如,在其中装置是焊炬或切割焊炬的焊接或切割操作期间),收发器从固定到装置上的惯性测量单元接收第二组陀螺仪输出样本。在操作装置期间,处理器计算用于第二组陀螺仪输出样本的一个或多个度量,基于用于第一组陀螺仪输出样本的一个或多个度量和用于第二组第二陀螺仪输出样本的一个或多个度量来产生装置是否处于准静态平衡的判定,并且基于第二组陀螺仪样本并且基于装置是否处于准静态平衡的判定来确定装置的角速度。处理器可以基于第一组陀螺仪输出样本的平均值来确定陀螺仪的漂移。在确定装置的角速度期间,处理器可以使用陀螺仪的漂移。如果判定是装置处于准静态平衡中,则装置的角速度的确定可以包括将角速度确定为第二组陀螺仪输出样本的平均值,以及如果判定是装置不处于准静态平衡中,则角速度的确定可以包括对漂移的补偿。角速度的确定可以包括在产生第一组陀螺仪输出样本期间惯性测量单元的温度与产生第二组陀螺仪输出样本期间的惯性测量单元的温度之间的差的补偿。一个或多个度量可以包括平均值和标准偏差中的一个或两者皆有。装置是否处于准静态平衡的判定的产生可以包括第一组陀螺仪输出样本的一个或多个度量和第二组陀螺仪输出样本的一个或多个度量之间的差或绝对差的确定。

[0161] 如本文所使用的,“和/或”是指通过“和/或”连接的列表中的任何一个或多个项。作为示例,“x和/或y”是指三元组 $\{(x), (y), (x, y)\}$ 中的任何元素。换句话说,“x和/或y”表示“x和y中的一个或两个”。作为另一个示例,“x,y和/或z”是指七元组 $\{(x), (y), (z), (x, y), (x, z), (y, z), (x, y, z)\}$ 中的任何元素。换句话说,“x,y和/或z”表示“x,y和z中的一个或多个”。

[0162] 本方法和/或系统可以在硬件、软件或硬件和软件的组合中实现。本方法和/或系统可以在至少一个计算系统中以集中式的方式实现,或以其中不同的元素分布在多个互连的计算系统中的分布式的方式实现。任何适用于执行本文描述的方法的计算系统或其他装置都是适合的。硬件和软件的典型组合可以是具有程序或其它代码的通用计算系统,当加载和执行时控制计算系统,使得其执行本文描述的方法。另一典型实现可以包括专用集成电路或芯片。一些实现可以包括其上存储有可由机器执行的一行或多行代码的非暂态机器可读(例如,计算机可读)介质(例如,闪存驱动器、光盘、磁存储盘等),从而使机器执行如本文所述的处理。

[0163] 虽然已经参考某些实现描述了本方法和/或系统,但是本领域的技术人员将会理解,在不脱离本方法和/或系统的范围的情况下,可以进行各种改变和等同替换。此外,在不脱离其范围的情况下,可以进行许多修改以使特定情况或材料适应本公开的教导。因此,本发明的方法和/或系统不限于所公开的特定实现,而本方法和/或系统将包括落入所附权利要求的范围内的所有实现。

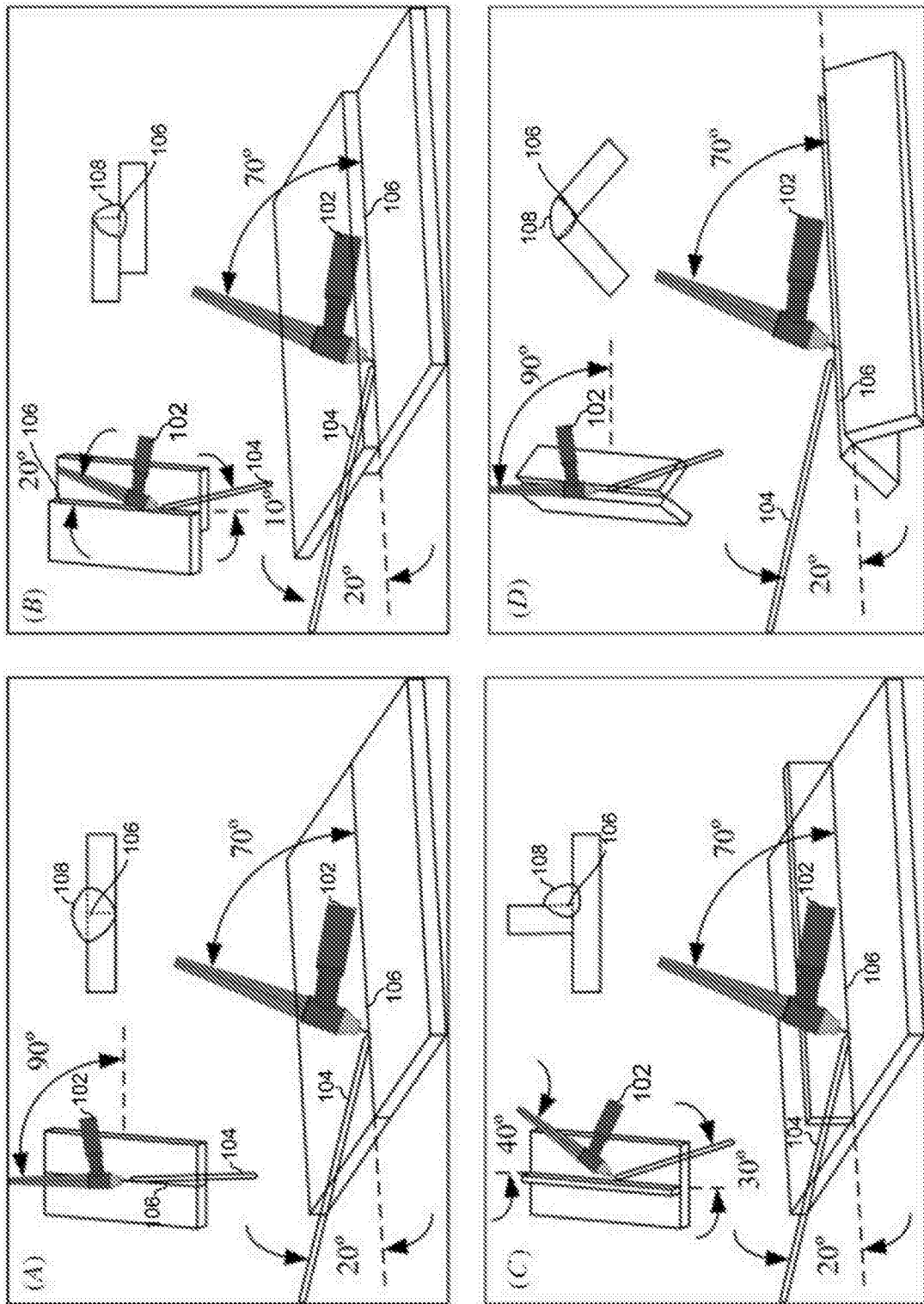


图1.GTAW过程中不同焊接类型的焊炬取向：(A)对焊；(B)搭焊接头；(C)T型接头；以及(D)角焊接头。

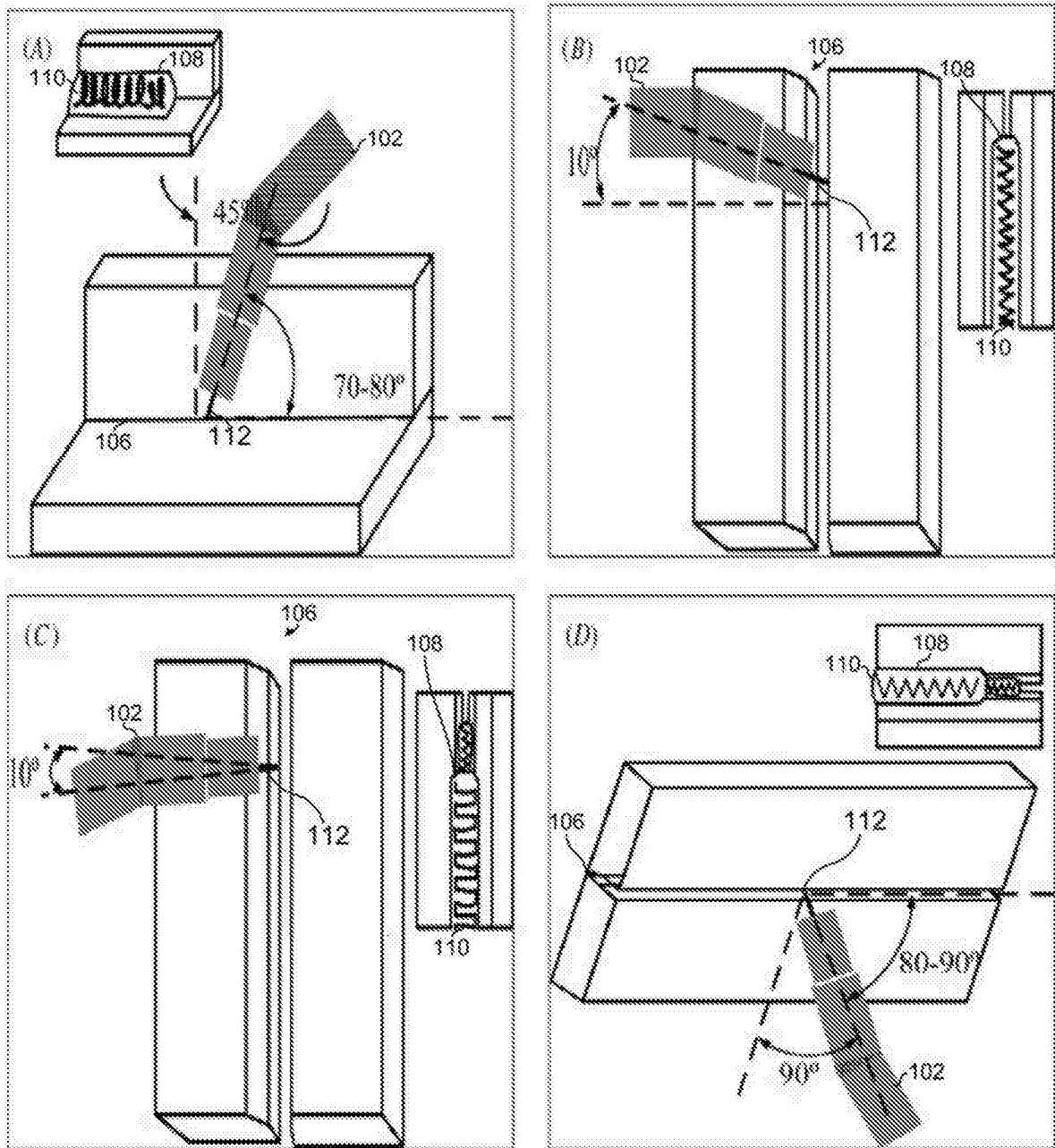


图2.GMAW过程中非合金钢和低合金钢中不同焊接类型的焊炬取向：(A) 2F/PB-水平-垂直圆角；(B) 3G↑/PF-垂直向上根部焊道和(C) 填充焊道；以及(D) 4G/PE仰焊。

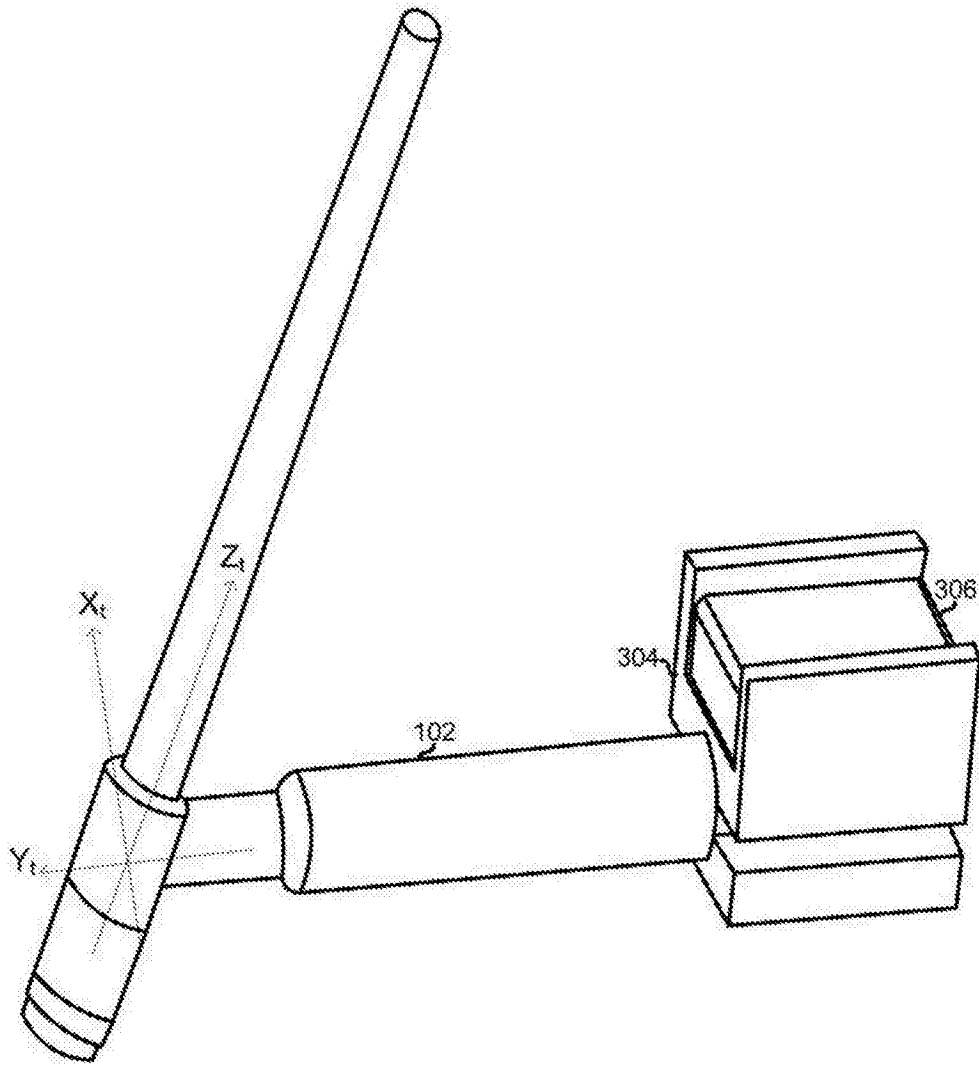


图3A

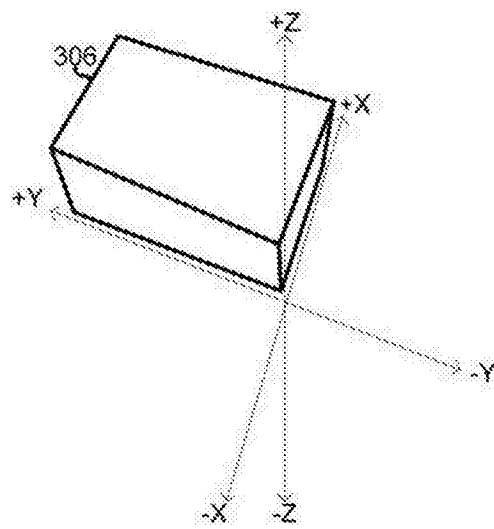


图3B

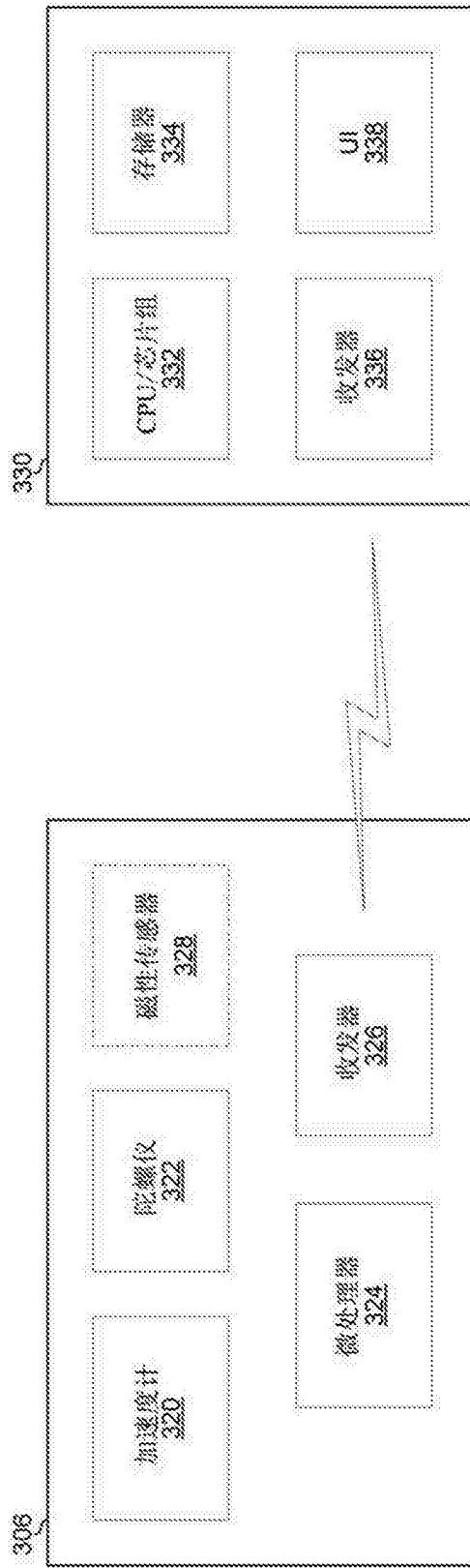


图3C

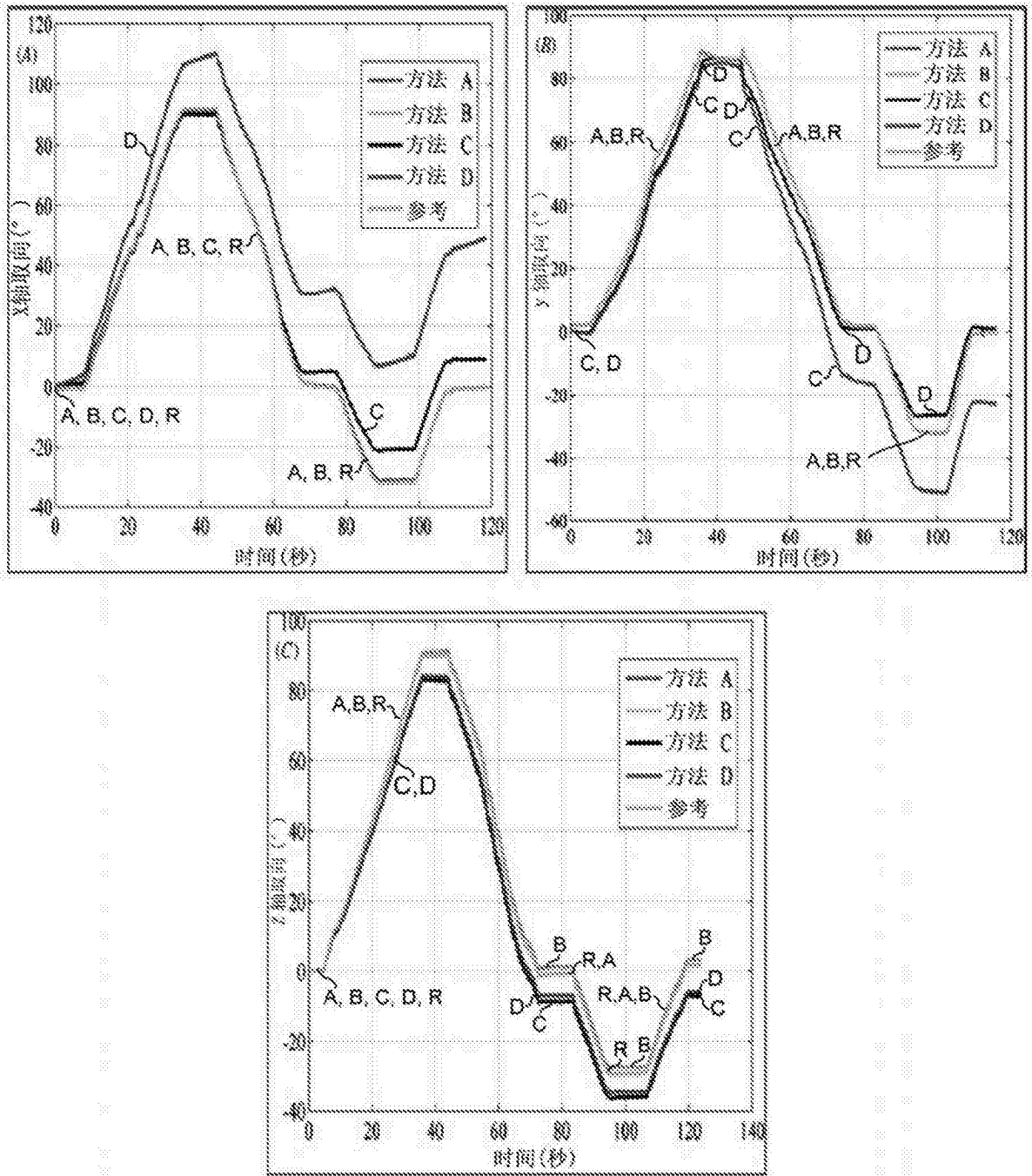


图 4. 采样率 $f_s = 128\text{Hz}$ 处的(A)使用数据集 D_1 的 x 轴, (B)使用数据集 D_2 的 y 轴, (C)使用数据集 D_3 的 z 轴的估计和参考取向 (欧拉角)。

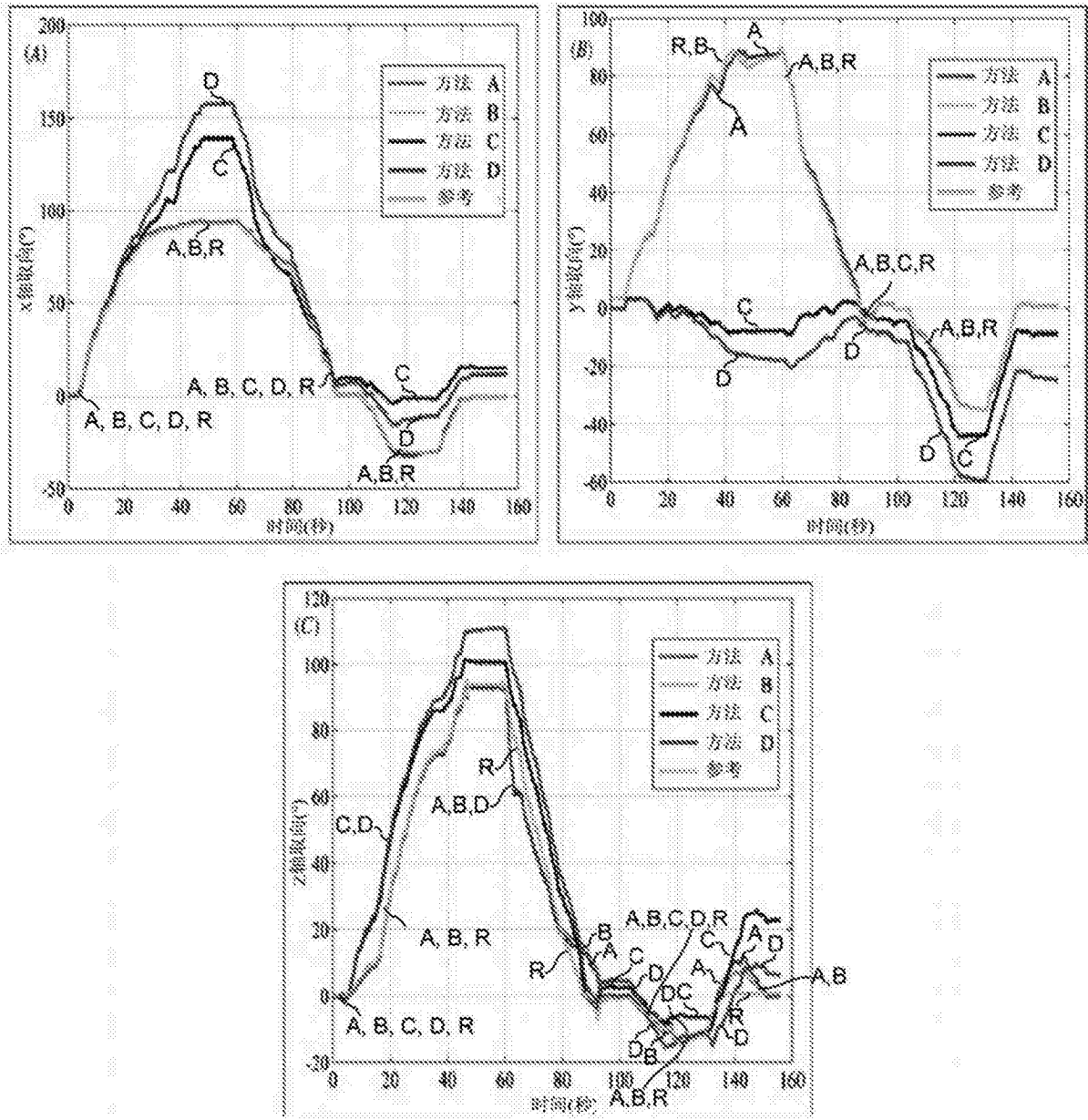


图5. 采样率 $f_s = 51.2\text{Hz}$ 处的欧拉角中的使用数据集 D_z^2 的(A) RMSE_x , (B) RMSE_y 和(C) RMSE_z 的取向的 RMSE。

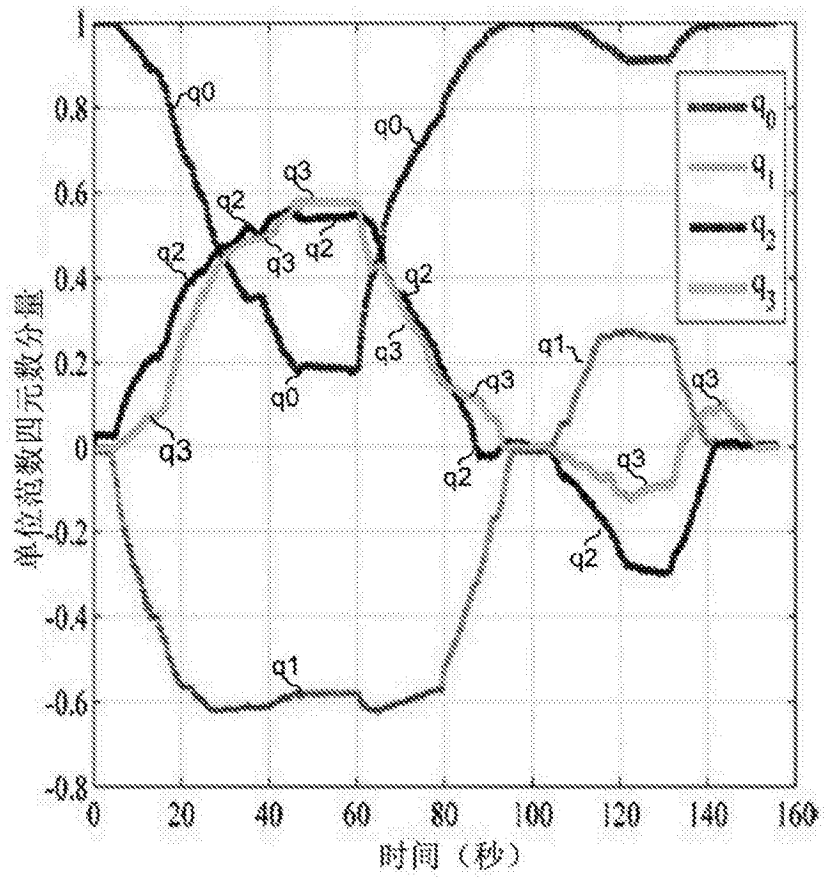


图 6. 使用方法 A 的采样率 $f_s = 51.2$ Hz 处的从数据集 D_i 获得的旋转的单位范数四元数。四元数分量是无量纲的。

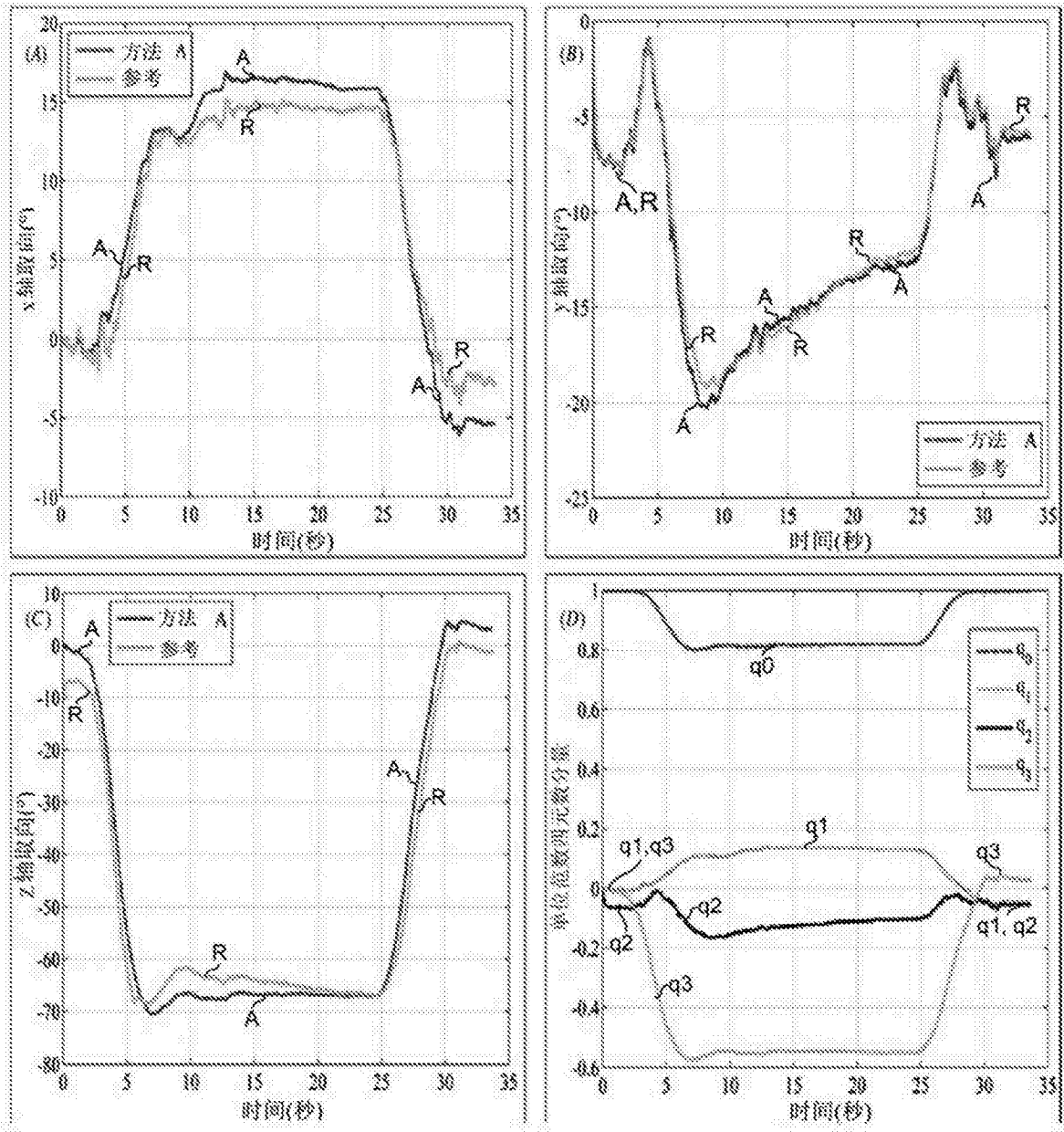


图7. 使用方法 A 的 GTAW 实验中的(A)X 轴, (B)y 轴和(C)z 轴以及(D)单位范数四元数分量的取向估计。使用的数据集是 D_1^* 。焊接类型是与图 1(B)对应的搭焊接头。

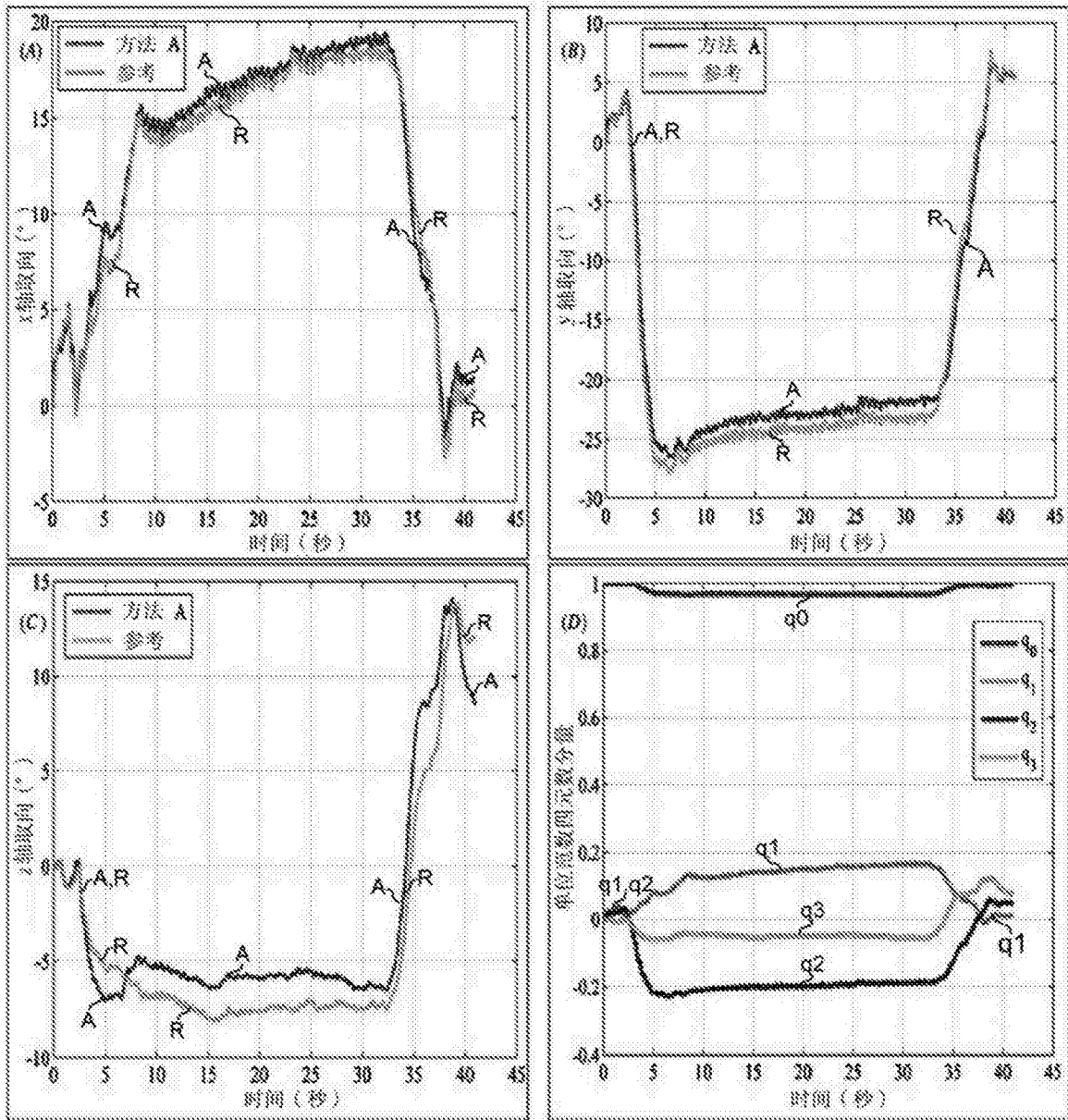


图 8. 使用方法 A 的 GMAW 实验中的(A)X 轴, (B)y 轴和(C)z 轴以及(D)单位范数四元数分量的取向估计。使用的数据集是 D_5^* 。焊接类型是对应于图 2(A)的水平-垂直圆角。

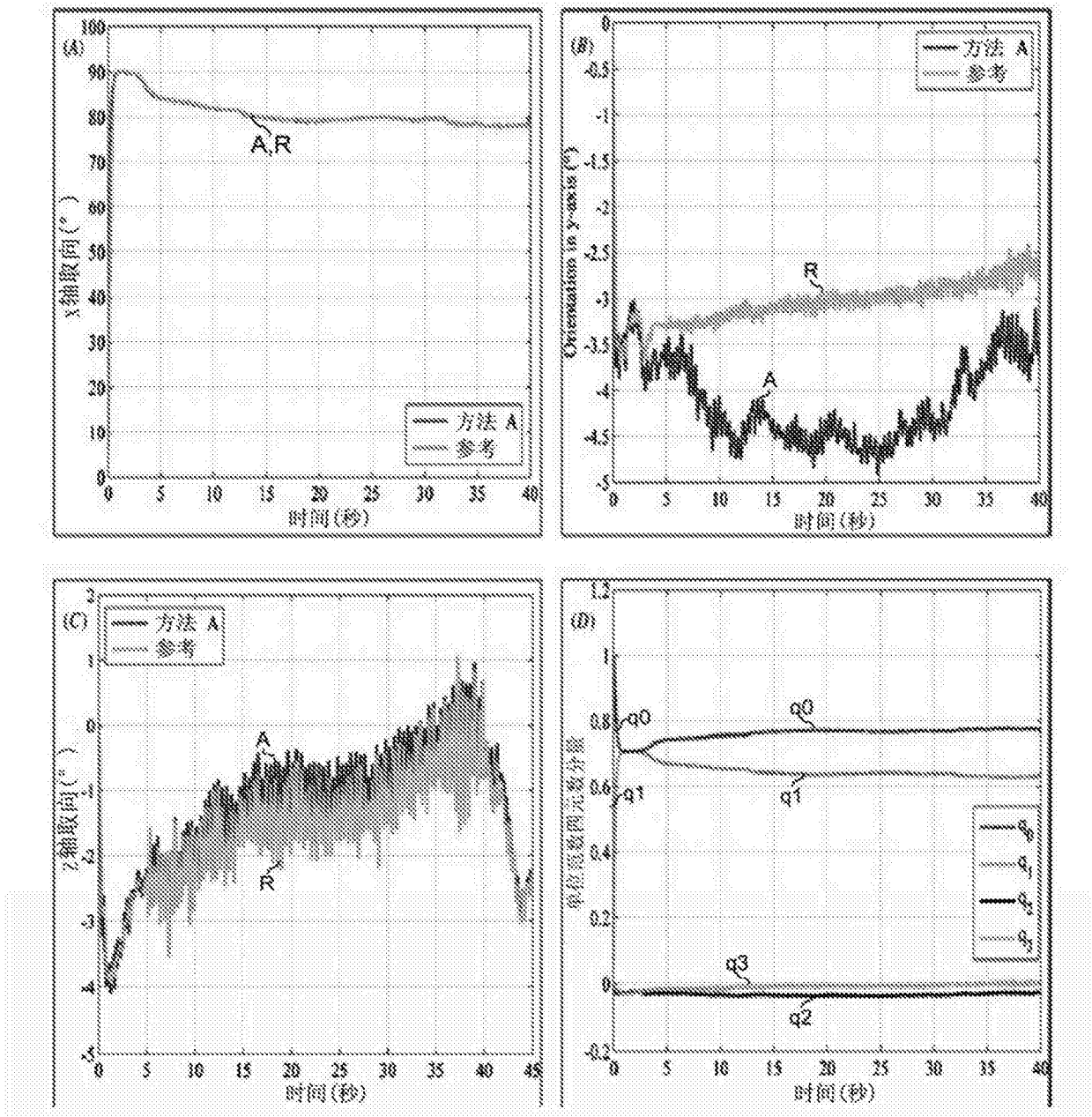


图 9. 使用方法 A 的一个 GMAW 实验中的(A)X 轴, (B)y 轴和(C)z 轴以及(D)单位范数四元数分量的取向估计。使用的数据集是 D_5^s 。焊接类型是对应于图 2(B)的垂直向上根部焊道。

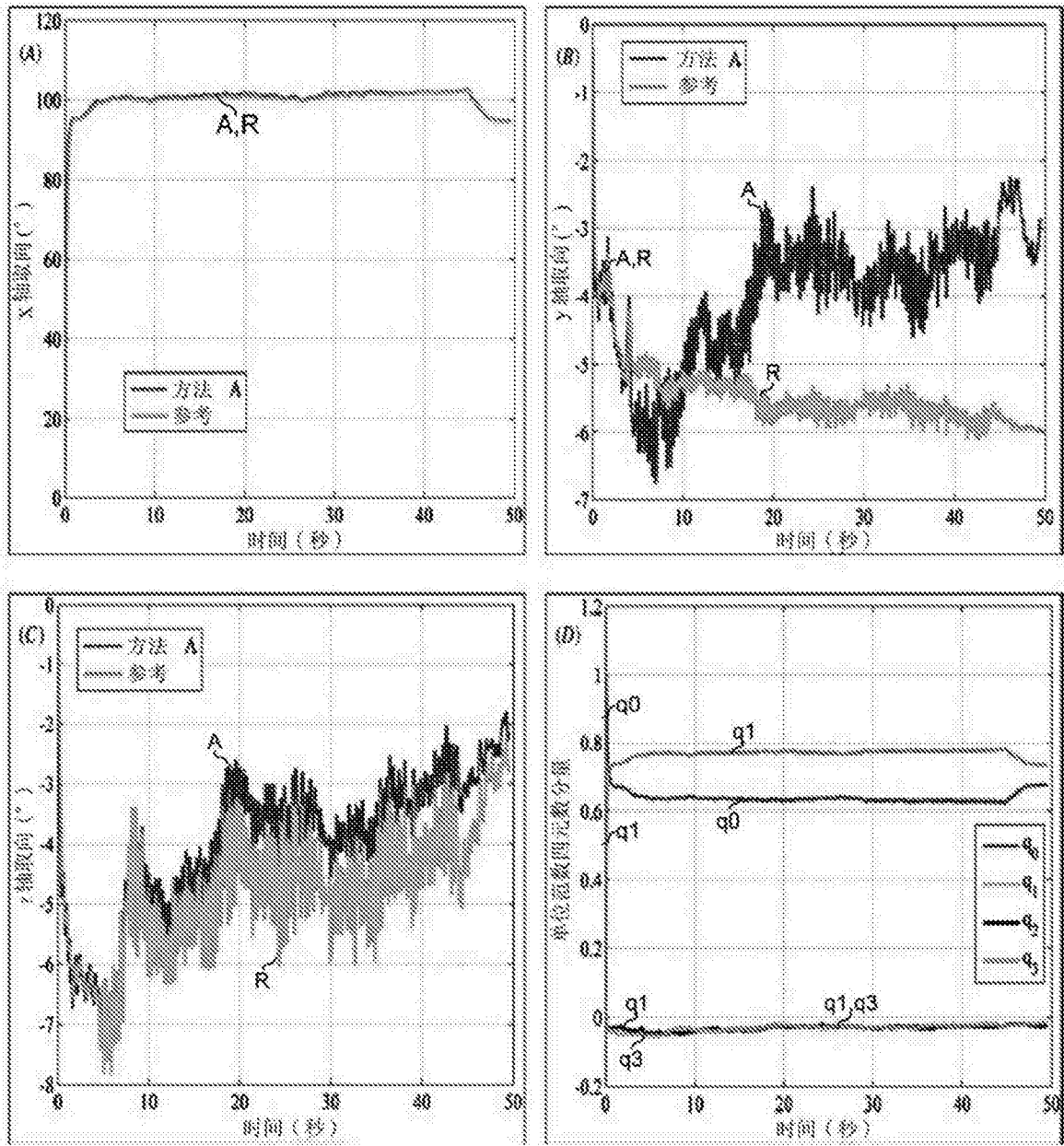


图 10. 使用方法 A 的 GMAW 实验中的(A)X 轴, (B)y 轴和(C)z 轴以及(D)单位范数四元数分量的取向估计。使用的数据集是 D_5^2 。焊接类型是对应于图 2(C)的垂直向上根部焊道。