

使用梯度下降算法估计 IMU 和 MARG 系统方向

Sebastian OH Madgwick, Andrew JL Harrison, Ravi Vaidyanathan

摘要—— 本文章提出了一种旨在支持高效计算和用于康复应用的可穿戴式惯性人体运动跟踪系统的新朝向算法。它适用于由三轴陀螺仪和加速度计组成的惯性测量单元 (IMU), 以及包括三轴磁角速度计和重力 (MARG) 传感器阵列。需要 MARG 先进行磁失真补偿。该算法使用四元数表示, 允许加速度计和磁力计数据在分析导出和优化的梯度下降算法中使用, 以将陀螺仪测量误差的方向计算为四元数导数。已经使用市售的方向传感器和光学测量系统获得的方向的参考, 以实践的方式评价性能。若以卡尔曼的定向传感器算法为基准比较性能, 结果表明该算法达到与基于卡尔曼算法的精度匹配的水平; 静态倾角均方根误差 $<0.8^\circ$, 动态均方根误差 $<1.7^\circ$ 。本算法的低计算负荷需求和小采样速率的运行需求显著降低了可穿戴惯性运动跟踪所需的硬件和功率, 使得能够设计出更轻巧、廉价、运行时间更久的可穿戴系统。

I. 简介

方向的准确测量在一系列领域中起着关键作用, 包括: 航空[1], 机器人[2], [3], 航海[4], [5]和人体运动分析[6] 机器交互[8]。在康复中, 运动跟踪是至关重要的促进技术, 特别是用于监测外部临床环境; 在理想情况下, 可以连续监测患者的活动, 并随后纠正。虽然已经进行了用于康复的运动跟踪的大量工作, 但是仍然需要实现能够长时间记录数据的较隐蔽的可穿戴系统。

Sebastian Madgwick 与布里斯托大学机械工程系, 电子邮件: s.madgwick@bristol.ac.uk.

Ravi Vaidyanathan 与位于皇后大学布里斯托大学的机械工程系, BS8 1TR 和美国海军研究生院系统工程系, 美国加利福尼亚州蒙特雷, 93940. 电子邮件: r.vaidyanathan@bristol. 阿克

Andrew Harrison 与布里斯托大学机械工程系, 电子邮件: andrew.jlharrison@bristol.ac.uk.

由于感测设备的处理, 数据存储和功率需求, 现有系统通常需要由受试者携带手提电脑或手持式 PC。这些系统在实验室环境之外是不实用的, 因此仅在对象在有限范围内运动, 且短时间段内可以获得详细数据。如果能够采集受试者在更长的时间段 (例如, 整天或甚至一周) 的更精确的行为数据将是

在这个领域的重要实用产品。在最近的一项调查中, Zhoua [7]引用了实时操作, 无线属性, 数据的正确性和可移植性作为实现临床监测可行性系统必须解决的主要缺陷。

A. 惯性运动跟踪系统

虽然有各种技术能够测量朝向, 但是基于惯性的传感系统具有完全自包含的优点, 使得测量实体既不受运动限制也不受任何特定环境或位置限制。IMU (惯性测量单元) 由陀螺仪和加速度计组成, 能够跟踪旋转和平移运动。为了在三维空间中测量, 需要由 3 个相互正交的敏感轴组成三轴传感器。MARG (磁, 角速率和重力) 传感器是结合 IMU 和三轴磁力计。IMU 单独只能测量相对于重力方向的姿态, 这对于许多应用是足够的[2], [1], [6]。MARG 系统, 也被称为 AHRS (姿态和航向参考系统) 能够提供一个完整的相对于重力和地球磁场的方向。定向估计算法在任何 IMU 或 MARG 系统的基本组成部分。这种方法将各自独立的传感器数据融合在一起, 产生一个最佳的方向估计。

卡尔曼滤波器[9]已经成为大多数定向算法[2], [10], [11], [12]和商业惯性取向传感器的公认基础; xsens [13], microstrain [14], VectorNav [15], Intersense [16], PNI [17]和 Crossbow [18] 基于卡尔曼的解决方案的广泛使用证明了它们的准确性和有效性, 然而, 它们具有许多缺点。它们可能实施起来较为复杂, 这反映在主题文献[2], [10],

[11], [12], [19], [20], [21], [22], [23]。基于 Kalman 过程的线性回归迭代需要远远超过物体带宽的采样率（例如，在 512Hz [13]和 30kHz [14]之间的采样率对于人类运动捕捉应用是必要的，其中系统可移植性非常关键。描述三维中旋转运动学的状态关系通常需要大的状态向量和扩展的卡尔曼滤波器实现[2], [12], [19]来线性化问题。

这些挑战需要用大量的计算负荷来实现基于卡尔曼的解决方案，并且提供明确的替代方法和理由。用于解决这些问题的方法已经实现了模糊处理[1], [3]或频域滤波器[24]以便利于在低角速度下的取向的加速度计测量和在高角速度下的集成陀螺仪测量。这种方法比较简单，但可能仅在有限的条件下有效。巴赫曼等人 [25]和马奥尼等 [26]目前的独立算法，都采用互补滤波器的方法。该算法结构已被证明能在相对较少的计算开销下提供有效的性能。

本文介绍了适用于 IMU 和 MARG 系统的定向估计算法。该算法采用方向的四元数表示（如：[25], [12], [19]）来描述三维方向的耦合性质，并且不受与欧拉角表示相关的奇点的影响。本文提出了新算法的完全推导过程和实验评估检验。它的性能经过了现有的商业滤波器和光学跟踪系统验证。

II 论文结构

第三节描述了方位估计算法的数学推导，包括参数化和磁畸变补偿的描述。第四节描述用于测试和验证算法性能的实验设备。第五节量化了算法的实验测试和准确性，并将其与现有系统进行比较。第七部分简要介绍了目前在我们的实验室中人体运动跟踪系统的实现细节，而第六节总结了这项工作的结论和贡献。在整篇论文中，采用 Craig [27]的前导上标和下标的符号系统用于表示方向和向量的相对坐标系。前导下标表示正在描述的坐标系，一个前导上标表示这是参考的坐标系。例如， ${}^A_B q$ 描述相对坐标系 B 的方向坐标系 A 和 ${}^A v$ 是在坐标系中描述的物体。

III. 算法推导

A. 角速度方向

三轴陀螺仪将测量有关传感器坐标系的 x, y 和 z 轴的角速率，分别称为 ω_x , ω_y and ω_z 。如果这些参数 (rads^{-1}) 被排列成如下图所示的向量 ${}^S \omega$ (1)，可以计算描述相对

于传感器坐标系 ${}^S q$ 地球坐标系的变化率的四元数[28]如方程 (2) 该 \otimes 操作表示四元数的乘积和单位长度的归一化。

$${}^S \omega = [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z] \quad (1)$$

$${}^S_E \dot{q} = \frac{1}{2} {}^S_E \hat{q} \otimes {}^S \omega \quad (2)$$

地球坐标系相对于传感器坐标系的取向在时间上记为 t , ${}^E_S q_{\omega,t}$ 可以通过数值积分的四元数 ${}^S_E q_{\omega,t}$ ，如由等式 (3) 和 (4) 计算，初始条件是已知。在这些等式中， ${}^S \omega_t$ 是在时间 t 测量的角速度， Δt 为采样周期，且 ${}^S q_{est,t-1}$ 为方向的先前估计。下标 ω 表明，四元数由角速率计算。

$${}^S_E \dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S_E \hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S \omega_t \quad (3)$$

$${}^S_E q_{\omega,t} = {}^S_E \hat{q}_{est,t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \Delta t \quad (4)$$

B. 同质场的取向

在方向估计算法的上下文中，将最初假设加速度计将仅测量重力，并且磁力计将仅测量地球的磁场。如果在地球坐标系中地球场的方向是已知的，则在传感器坐标系内的场的方向的测量将使计算传感器坐标系相对于地球坐标系的方向成为可能。然而，对于任何给定的测量，将不存在唯一的传感器方向计算方案，而是存在由围绕与场平行的轴的真实取向旋转实现的所有那些方向表示的无限解。四元数表示需要找到单个解。这可以通过传感器的方向方程的最优解问题解决。 ${}^S q$ 是在传感器坐标系中测量的得到的，其中包含在地球坐标系中先导方向的信息 ${}^E \hat{d}$ 。因此可以求解 (5)，其中等式 (6) 定义了目标函数。

$$\min_{{}^S_E \hat{q} \in \mathbb{R}^4} f({}^S_E \hat{q}, {}^E \hat{d}, {}^S \hat{s}) \quad (5)$$

$$f({}^S_E \hat{q}, {}^E \hat{d}, {}^S \hat{s}) = {}^S_E \hat{q}^* \otimes {}^E \hat{d} \otimes {}^S_E \hat{q} - {}^S \hat{s} \quad (6)$$

已经存在许多优化算法，但梯度下降算法是最简单的实现和计算之一。式 (7) 描述了基于一个“初始猜测”方向 ${}^S_E \hat{q}_0$ 和一个变步长 μ 对 ${}^S_E \hat{q}_{n+1}$ 的方向估计 $N + n$ 次迭代的梯度下降算法。等式 (8) 计算由目标函数 f 和其雅可比 J 导致的求解方向误差。

$${}^S_E \hat{q}_{k+1} = {}^S_E \hat{q}_k - \mu \frac{\nabla f({}^S_E \hat{q}_k, {}^E \hat{d}, {}^S \hat{s})}{\left\| \nabla f({}^S_E \hat{q}_k, {}^E \hat{d}, {}^S \hat{s}) \right\|}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\nabla f(\hat{S}_E \hat{q}_k, {}^E \hat{d}, {}^S \hat{s}) = J^T(\hat{S}_E \hat{q}_k, {}^E \hat{d}) f(\hat{S}_E \hat{q}_k, {}^E \hat{d}, {}^S \hat{s}) \quad (8)$$

等式 (7) 和 (8) 描述了适用于在任何方向上预猜测的算法的一般形式。然而, 如果场的参考方向被定义为仅具有在地球坐标系的主轴的 1 或 2 内的分量, 则方程简化。适当的约束将假定重力方向定义垂直, Z 轴所示的公式 (10)。替代 E_g 和归一化加速度计测量 S_a 为 E_d 和 S_s 表示, 得到由公式 (12) 和 (13) 所定义的简化的目标函数和雅可比。

$$\hat{S}_E \hat{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4] \quad (9)$$

$${}^E \hat{g} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (10)$$

$${}^S \hat{a} = [0 \quad a_x \quad a_y \quad a_z] \quad (11)$$

$$f_g(\hat{S}_E \hat{q}, {}^S \hat{a}) = \begin{bmatrix} 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) - a_x \\ 2(q_1 q_2 + q_3 q_4) - a_y \\ 2(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2) - a_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J_g(\hat{S}_E \hat{q}) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

地球磁场可以被认为在一个水平轴和垂直轴上具有分量; 由于这是在英国[29], 垂直分量有 65°和 70°之间到水平倾斜度。这可以由等式 (14) 表示。取代的 ${}^E \hat{b}$ 和磁力测量 ${}^S \hat{m}$ 为 ${}^E \hat{d}$ 和 ${}^S \hat{s}$ 表示, 得到由公式 (16) 和 (17) 定义的简化的目标函数和雅可比。

$${}^E \hat{b} = [0 \quad b_x \quad 0 \quad b_z] \quad (14)$$

$${}^S \hat{m} = [0 \quad m_x \quad m_y \quad m_z] \quad (15)$$

$$f_b(\hat{S}_E \hat{q}, {}^E \hat{b}, {}^S \hat{m}) = \begin{bmatrix} 2b_x(0.5 - q_3^2 - q_4^2) + \\ 2b_x(q_2 q_3 - q_1 q_4) + \\ 2b_x(q_1 q_3 + q_2 q_4) + \\ 2b_z(q_2 q_4 - q_1 q_3) - m_x \\ 2b_z(q_1 q_2 + q_3 q_4) - m_y \\ 2b_z(0.5 - q_2^2 - q_3^2) - m_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$J_b(\hat{S}_E \hat{q}, {}^E \hat{b}) = \begin{bmatrix} -2b_x q_3 & 2b_z q_4 \\ -2b_x q_4 + 2b_z q_2 & 2b_x q_3 + 2b_z q_1 \\ 2b_x q_3 & 2b_x q_4 - 4b_z q_2 \\ -4b_x q_3 - 2b_z q_1 & -4b_x q_4 + 2b_z q_2 \\ 2b_x q_2 + 2b_z q_4 & -2b_x q_1 + 2b_z q_3 \\ 2b_x q_1 - 4b_z q_3 & 2b_x q_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

如我们已经讨论的, 只测量重力或地球的磁场本身不会提供传感器的唯一方向。为此, 可以如等式 (18) 和 (19) 所描述的那样组合两个场的测量和参考方向。而由方程 (12) 和 (16) 中的目标函数创建的解具有有限定的全局最小值, 由方程 (18) 定义的解具有由单个点定义的最小值。

$$f_{g,b}(\hat{S}_E \hat{q}, {}^S \hat{a}, {}^E \hat{b}, {}^S \hat{m}) = \begin{bmatrix} f_g(\hat{S}_E \hat{q}, {}^S \hat{a}) \\ f_b(\hat{S}_E \hat{q}, {}^E \hat{b}, {}^S \hat{m}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$J_{g,b}(\hat{S}_E \hat{q}, {}^E \hat{b}) = \begin{bmatrix} J_g^T(\hat{S}_E \hat{q}) \\ J_b^T(\hat{S}_E \hat{q}, {}^E \hat{b}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

常规的优化方法需要为每个新方向和相应的传感器测量计算方程 (7) 的多次迭代。然而, 这中算法可以被接受的计算条件是估计取向的收敛速度是等于或大于物理方位的变化率的。公式 (20) 通过传感器测量定义 ${}^S \hat{a}_t$ 和 ${}^S \hat{m}_t$ 对于时间 t 采样, 计算估计的方向 ${}^S \hat{q}_{\nabla,t}$, 在时间 t 计算基于方向的先前估计 ${}^S \hat{q}_{est,t-1}$ 和目标函数误差 ∇f 。 ∇f 的形式, 根据在使用所述传感器选择, 如公式 (21)。下标 ∇ 表明, 四元数使用梯度下降算法进行计算。

$${}^S \hat{q}_{\nabla,t} = {}^S \hat{q}_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (20)$$

$$\nabla f = \begin{bmatrix} J_g^T(\hat{S}_E \hat{q}_{est,t-1}) f_g(\hat{S}_E \hat{q}_{est,t-1}, {}^S \hat{a}_t) \\ J_{g,b}^T(\hat{S}_E \hat{q}_{est,t-1}, {}^E \hat{b}) f_{g,b}(\hat{S}_E \hat{q}_{est,t-1}, {}^S \hat{a}_t, {}^E \hat{b}, {}^S \hat{m}_t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

μ_t 的适当值是保证 ${}^S \hat{q}_{\nabla,t}$ 的收敛速度, t 是有限的物理取向率, 因为这避免了由于不必要的大步长过冲。因此 μ_t 的计算如下方程 (22) 其中 Δt 是采样周期, ${}^S \hat{q}_{\omega,t}$ 是由陀螺仪测得的传感器角度发生变化的角速率, α 测定取向的变化的速率的 μ , 负责解释加速度计和磁力计的噪声。

$$\mu_t = \alpha \|\hat{S}_E \dot{\hat{q}}_{\omega,t}\| \Delta t, \alpha > 1 \quad (22)$$

C. 算法融合过程

在实践中, ${}^S \hat{q}_{\omega,t}$ 可能从不正确的初始条件和由于陀螺仪测量噪声引起的一定误差开始, ${}^S \hat{q}_{\nabla,t}$ 将在加速度计不稳定或磁力计受到干扰时提供不正确的估计。融合算法的目的是提供一个方向估计, 其中 ${}^S \hat{q}_{\omega,t}$ 是用来滤除高频率误差 ${}^S \hat{q}_{\nabla,t}$ 和 ${}^S \hat{q}_{\omega,t}$ 以及提供融合 ${}^S \hat{q}_{\nabla,t}$, 同时以补偿初始条件的积分漂移。

相对于传感器坐标系, ${}^S_e q_{est,t}$ 大地坐标系的估计方向, 通过两个不同的方向计算, ${}^S_e q_{\omega,t}$ 和 ${}^S_e q_{\nabla,t}$ 的融合由方程 (23) 来获得。其中 γ_t 与 $(1 - \gamma_t)$ 表示施加到每个测量值计算权重。

$${}^S_e q_{est,t} = \gamma_t {}^S_e q_{\nabla,t} + (1 - \gamma_t) {}^S_e q_{\omega,t}, \quad 0 \leq \gamma_t \leq 1 \quad (23)$$

因此, γ_t 的最佳取值是保证使发散的加权率 ${}^S_e q_{\omega}$ 由于整体漂移等于 ${}^S_e q_{\nabla}$ 的收敛加权率。这由等式 (24) 表示, 其中 $\frac{\mu_t}{\Delta t}$ 是 ${}^S_e q_{\nabla}$ 和 β 的收敛速度 ${}^S_e q_{\omega}$ 的发散率表示为对应于陀螺仪的测量误差四元数的幅度。公式 (24) 可以被重新排列以作为方程 (25) 限定 γ_t 。

$$(1 - \gamma_t)\beta = \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t} \quad (24)$$

$$\gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu_t}{\Delta t} + \beta} \quad (25)$$

融合过程确保了最佳融合 ${}^S_e q_{\omega,t}$ 和 ${}^S_e q_{\nabla,t}$ 。假设收敛速率为 ${}^S_e q_{\nabla}$ (受 α 影响) 等于或大于取向的变化的物理速率。因此参数 α 没有上限。当 α 被假定为非常大, 则 μ_t 通过式 (22) 中所定义, 也将变得非常大, 并且同时使方程简化。在方程的 μ_t 的较大值 (20) 表示 ${}^S_e \hat{q}_{est,t-1}$ 变得可忽略, 并且方程可以重写为方程 (26)。

$${}^S_e q_{\nabla,t} \approx -\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (26)$$

如果分母中的 β 项变为可忽略不计和等式可改写为方程 (27) 的公式 (25) γ_t 时定义也简化。从等式 (27) 也可以假设 $\gamma_t \approx 0$ 。

$$\gamma_t \approx 0, \quad \gamma_t \approx \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \quad (27)$$

将等式 (4), (26) 和 (27) 代入等式 (23) 直接得到等式 (28)。要注意, 在公式 (28) 中, γ_t 已经作为 0 代入其中。

$${}^S_e q_{est,t} = \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \left(-\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \right) + (1-0) \left({}^S_e \hat{q}_{est,t-1} + {}^S_e \dot{q}_{\omega,t} \Delta t \right) \quad (28)$$

可以将等式 (28) 简化为等式 (29) 其中 ${}^S_e q_{est,t}$ 是由公式 (30) 所定义的估计定向率。

$${}^S_e q_{est,t} = {}^S_e \hat{q}_{est,t-1} + {}^S_e \dot{q}_{est,t} \Delta t \quad (29)$$

$${}^S_e \dot{q}_{est,t} = {}^S_e \dot{q}_{\omega,t} - \beta \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (30)$$

可以从方程 (29) 和 (30) 看到, 该计算算法由数值积分取向 ${}^S_e q_{est,t}$ 的变化率估计的取向 ${}^S_e q_{est,t}$ 。该算法计算 ${}^S_e q_{est,t}$ 如由陀螺仪测得的取向的变化率, ${}^S_e q_{\omega,t}$, 与陀螺仪的测量误差的幅值, β , 在根据加速度计和磁力测量的方向除去。图 1 展示了用于 IMU 的完整方位估计算法实现的框图表示。

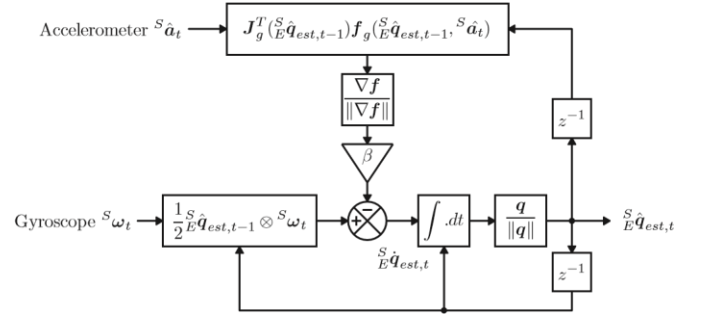


图 1 用于 IMU 实现的完整方位估计算法的框图

D. 磁失真补偿

针对磁变形对方向传感器性能的影响的研究已经表明, 包括电器, 金属家具和建筑结构内的金属结构的源头可能引入实质性的误差[30], [31]。固定在传感器坐标系中的干扰源 (称为硬磁误差) 可以通过校准[32], [33], [34], [35]去除。地球坐标系中的干扰源, 称为软磁误差, 只有在有定向的附加参考的情况下才可以去除。加速度计提供姿态的参考, 因此可以用于补偿测量的地球磁场中的倾斜误差。

在时间 t 中, ${}^E \hat{h}_t$ 在地球坐标系中的地球磁场的测量方向可以由等式 (31) 计算。在测得的地球磁场方向中, ${}^E \hat{h}_t$ 的误差倾向的效果, 可以如地球磁场中用算法的基准方向进行修正。如等式 (32) 所述。

$${}^E \hat{h}_t = [0 \quad h_x \quad h_y \quad h_z] = {}^S_e \hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S \hat{m}_t \otimes {}^S_e \hat{q}_{est,t-1}^* \quad (31)$$

$${}^E \hat{b}_t = [0 \quad \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \quad 0 \quad h_z] \quad (32)$$

以这种方式补偿磁变形确保磁干扰被限制为仅影响取向的估计的航向分量。该方法还消除了对预定义的地球磁场的参考方向的需要; 其他方向估计算法的潜在缺点[12], [19]。图 2 示出了用于包括磁失真补偿的 MARG 传感器阵列的完整算法实现的框图表示。

E. 算法可调参数

取向估计算法需要 1 个可调节参数, β 代表陀螺仪的测量误差, 表示为一个四元数的幅度。可以方便的参量 ω_{\max} 限定 β 来代表每个轴的陀螺仪的最大测量误差。

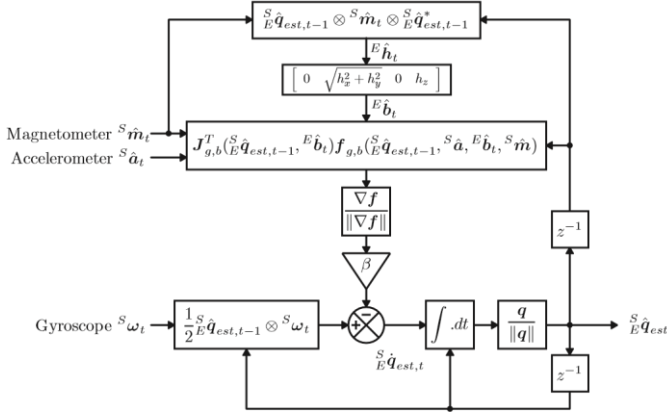


图 2.完整的方向估计算法框图表示为 MARG(包括磁失真补偿)

使用由方程 (2) 中所描述的关系, β 可以由等式 (33) 定义。其中 q 是任何单位四元数。

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \hat{q} \otimes [0 \quad \tilde{\omega}_{\max} \quad \tilde{\omega}_{\max} \quad \tilde{\omega}_{\max}] \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_{\max} \quad (33)$$

IV. 实验设备

该算法使用包括 16 位分辨率三轴陀螺仪, 加速度计和磁力计的 xsens MTx 定向传感器[13]在内的器件进行测试。原始传感器数据以 512Hz 频率采集, 并被记录到 PC 中, 同时导入附带软件, 以提供校准的传感器测量, 然后由本文提出的方向估计算法处理。软件还结合了适当的基于卡尔曼的定向估计算法。由基于卡尔曼的算法和提出的方向估计算法使用相同的传感器数据计算, 可以独立于传感器性能, 每个算法的性能可以相对于彼此评估。

使用由连接到 MXultranet 服务器[36]和 Nexus [37]软件的 8 个 MX3 + 摄像机组成的 Vicon 系统来提供方位传感器实际方向的参考测量。为此, 将传感器固定到取向测量平台。在 120Hz 下记录连接到平台的光学标记的位置, 然后进行后处理以计算测量平台和传感器的取向。为了使摄像机坐标系中的取向的测量与地球坐标系中的取向的算法估计相当, 需要初始校准程序, 其中测量摄像机坐标系中地球的磁场和重力场的方向使用磁罗盘和具有附接的光学标记。

V 实验结果

通常将方位传感器性能量化为静态和动态均方根 (RMS)[19], [21], [13], [14], [15]

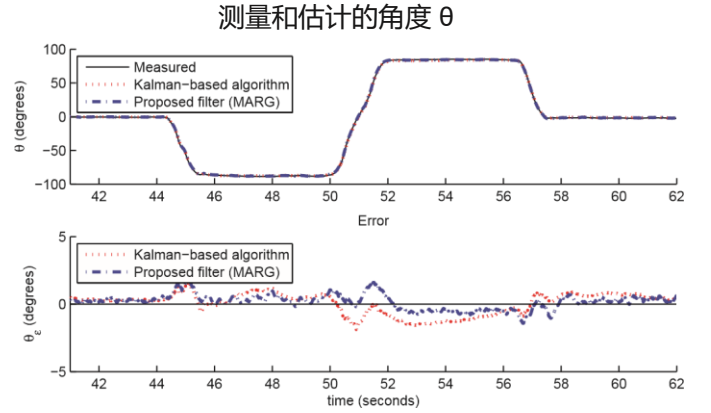


图 3.测量和估计的角度 θ (底部)

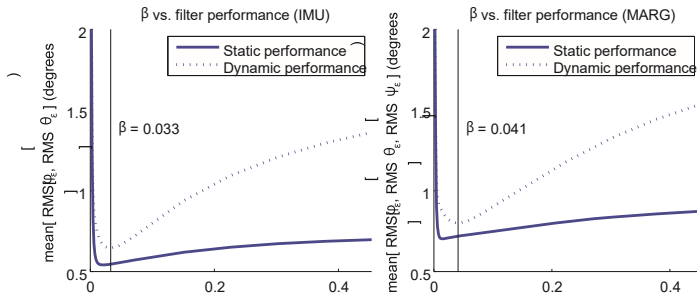
表 I 基于卡尔曼的算法和本文的方向估计算法的静态和动态均方根误差

Euler parameter	Kalman-based algorithm	MARG algorithm	IMU algorithm
RMS[ϕ_e] static	0.789°	0.581°	0.594°
RMS[ϕ_e] dynamic	0.769°	0.625°	0.623°
RMS[θ_e] static	0.819°	0.502°	0.497°
RMS[θ_e] dynamic	0.847°	0.668°	0.668°
RMS[ψ_e] static	1.150°	1.073°	N/A
RMS[ψ_e] dynamic	1.344°	1.110°	N/A

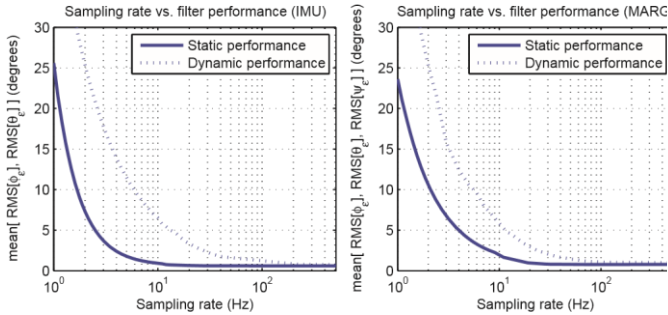
与欧拉参数无耦合关联的根均方错误参数描述的俯仰角 ϕ , 横滚角 θ 和航向角, 分别对应于周围的传感器坐标系 x , y 和 z 轴旋转。总共 4 组欧拉参数被计算, 对应于校准的方向的光学测量量, 基于卡尔曼的算法估计的方向和所提出的算法估计 MARG 和 IMU 实现的方向。估计的欧拉参数的误差, ϕ_e , θ_e 和 ψ_e , 分别计算估算值和校准的光学传感器测量结果之间的差异。对比预先形成的每个轴周围的旋转序列获得结果。该实验重复 8 次以汇集表示系统性能的数据集。在 MARG 和 IMU 执行中, 所提出的算法的可调参数, β 被设定为 0.033。试验总结在图 4 中, 发现这些值提供了最佳性能。图 3 显示了基于 Kalman 的算法和提出的算法 MARG 实现结果。

静态和动态 RMS 值 ϕ_e , θ_e 和 ψ_e 计算假定静止状态时测得的相应的角率为 $<5^\circ/s$, 而动态时 $\geq 5^\circ/s$ 。该阈值被选择为足够大于数据的本底噪声。结果总结在表 I 中, 其中每个值表示所有 8 个实验的平均值。

调查对算法性能的可调整参数 β 的作用的结果总结于图 4 中。实验数据通过分别提出的算法 IMU 和 MARG 植入。



图。4.调节参数 β ，对算法性能的影响 IMU（左）和 MARG（右）实现



图。5.采样率对所提算法 IMU（左）和 MARG（右）实现的性能的影响

系统，使用 β 的固定值 0~0.5。还有就是 β 足够高，以最大限度地减少错误，由于整体漂移，但足够低，不必要的噪音并不需要大步长，梯度下降迭代计算出了明确的最优值。

图 5 总结了采样率对算法性能的影响的调查结果。实验数据在被单独算法的 IMU 和 MARG 处理时，使用前面定义的最佳值 β 。抽取实验数据以模拟 1Hz 和 512Hz 之间的采样率。从图 5 可以看出，所提出的算法在 50Hz 实现与在 512Hz 相似的性能水平。两个算法以 10Hz 的频率采样是能够实现静态错误 $< 2^\circ$ 和动态误差 $< 7^\circ$ 。这种精度水平对于人类运动应用可能是足够的，尽管采样率将限制可以测量的运动的带宽。

VI. 结论

惯性/磁传感器的定向估计算法是一个成熟的研究领域。现代技术[25], [26], [38]侧重于更简单的算法，以改善与传统的基于卡尔曼方法相关的计算负荷和参数调整负担。本文提出的算法采用与其他算法类似的过程，但通过新颖的推导，能够提供一些关键的优势：

基于分析导出的雅可比矩阵计算误差导致计算的显著减少

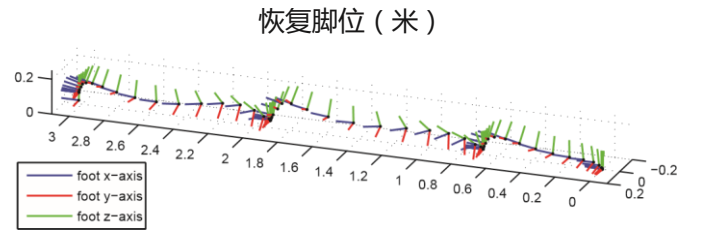


图 6.以每秒 20 个采样点绘制恢复的脚位置

负荷相对于高斯 - 牛顿法[25]; 分别被定量为 IMU 和 MARG 实现的 C 代码实现的每次更新的 109 和 248 标量算术运算。

反馈误差的归一化允许基于可观察的系统特性来定义最佳增益。磁失真补偿算法省去了磁场的方向，以由设计者预先设定。

消除磁场的预定方向是优于本文引用的所有其他算法的优点; 尽管该组件可以容易地并入到其他算法中。已经为现成的，领先的商业单元提供了通过精密光学测量系统获得的参考测量的实验研究。这些研究使得该算法能够被基准化，并且表明该算法与基于专有卡尔曼的系统一样好; 即使在降低采样率时具有完全的数量级。

VII 未来工作

目前正在进行研究以将取向估计算法并入用于修复应用的自足式人体运动跟踪系统中。如前所述，Zhoua [7]引用了实时操作，无线属性，数据的正确性和可移植性作为要解决的主要挑战。本工作中引入的算法提供的计算负荷的减少和相对容易的调整解决了所有这些问题; 其效率允许在低功率，低性能，硬件上实现显著减小的尺寸，而其采样率允许更长时间的数据存储和更简单的实施用于无线数据传输。

该算法当前被实现为 MARG 套件，数据存储单元和电源的独立系统的核心，该系统足够小以适合用于下肢运动跟踪的运动鞋的鞋底内。图 6 示出了当沿直线行进时使用用于跟踪测试对象的右脚的原型单元获得的数据。使用类似于[39], [40], [41], [42], [43]的方法回收平移位置数据。三个步骤的测量距离为 3.0m，而恢复的位移为 3.00m。一个完整的系统目前正在开发中，以便在非结构化环境中进行长期（1 周+）运动跟踪。

引用

- [1] S. K. Hong, "Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (uav)," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 107, no. 2, pp. 109–118, 2003.
- [2] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte, "Inertial navigation systems for mobile robots," vol. 11, pp. 328–342, June 1995.
- [3] L. Ojeda and J. Borenstein, "Flexnav: fuzzy logic expert rule-based position estimation for mobile robots on rugged terrain," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '02*, vol. 1, pp. 317–322, May 11–15, 2002.
- [4] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown inertial navigation technology*. The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [5] S. Beauregard, "Omnidirectional pedestrian navigation for first responders," in *Proc. 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication WPNC '07*, pp. 33–36, Mar. 22–22, 2007.
- [6] H. J. Luinge and P. H. Veltink, "Inclination measurement of human movement using a 3-d accelerometer with autocalibration," vol. 12, pp. 112–121, Mar. 2004.
- [7] H. Zhou and H. Hu, "Human motion tracking for rehabilitation—a survey," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 3, no. 1, pp. 1–18, 2008.
- [8] E. A. Heinz, K. S. Kunze, M. Gruber, D. Bannach, and P. Lukowicz, "Using wearable sensors for real-time recognition tasks in games of martial arts - an initial experiment," in *Proc. IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pp. 98–102, May 22–24, 2006.
- [9] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35–45, 1960.
- [10] E. Foxlin, "Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias kalman filter," in *Proc. Virtual Reality Annual International Symposium the IEEE 1996*, pp. 185–194, 267, Mar. 30–Apr. 3, 1996.
- [11] H. J. Luinge, P. H. Veltink, and C. T. M. Baten, "Estimation of orientation with gyroscopes and accelerometers," in *Proc. First Joint [Engineering in Medicine and Biology 21st Annual Conf. and the 1999 Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Soc.] BMES/EMBS Conference*, vol. 2, p. 844, Oct. 13–16, 1999.
- [12] J. L. Marins, X. Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee, and M. J. Zyda, "An extended kalman filter for quaternion-based orientation estimation using marg sensors," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 4, pp. 2003–2011, Oct. 29–Nov. 3, 2001.
- [13] Xsens Technologies B.V., *MTi and MTx User Manual and Technical Documentation*. Pantheon 6a, 7521 PR Enschede, The Netherlands, May 2009.
- [14] MicroStrain Inc., *3DM-GX3 -25 Miniature Attitude Heading Reference Sensor*. 459 Hurricane Lane, Suite 102, Williston, VT 05495 USA, 1.04 ed., 2009.
- [15] VectorNav Technologies, LLC, *VN -100 User Manual*. College Station, TX 77840 USA, preliminary ed., 2009.
- [16] InterSense, Inc., *InertiaCube2+ Manual*. 36 Crosby Drive, Suite 150, Bedford, MA 01730, USA, 1.0 ed., 2008.
- [17] PNI sensor corporation, *Spacepoint Fusion*. 133 Aviation Blvd, Suite 101, Santa Rosa, CA 95403-1084 USA.
- [18] Crossbow Technology, Inc., *AHRS400 Series Users Manual*. 4145 N. First Street, San Jose, CA 95134, rev. c ed., February 2007.
- [19] A. M. Sabatini, "Quaternion-based extended kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing," vol. 53, pp. 1346–1356, July 2006.
- [20] H. J. Luinge and P. H. Veltink, "Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers," *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 43, pp. 273–282, April 2006.
- [21] D. Jurman, M. Jankovec, R. Kamnik, and M. Topic, "Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, pp. 411–420, August 2007.
- [22] M. Haid and J. Breitenbach, "Low cost inertial orientation tracking with kalman filter," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 153, pp. 567–575, June 2004.
- [23] D. Roetenberg, H. J. Luinge, C. T. M. Baten, and P. H. Veltink, "Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation," vol. 13, pp. 395–405, Sept. 2005.
- [24] R. A. Hyde, L. P. Ketteringham, S. A. Neild, and R. J. S. Jones, "Estimation of upper-limb orientation based on accelerometer and gyroscope measurements," vol. 55, pp. 746–754, Feb. 2008.
- [25] E. R. Bachmann, R. B. McGhee, X. Yun, and M. J. Zyda, "Inertial and magnetic posture tracking for inserting humans into networked virtual environments," pp. 9–16, 2001.
- [26] R. Mahony, T. Hamel, and J.-M. Pflimlin, "Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1203–1218, June 2008.
- [27] J. J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. Pearson Education International, 2005.
- [28] D. R. P. R. B. M. Joseph M. Cooke, Michael J. Zyda, "Npsnet: Flight simulation dynamic modelling using quaternions," *Presence*, vol. 1, pp. 404–420, 1994.
- [29] J. A. Jacobs, *The earth's core*, vol. 37 of International geophysics series. Academic Press, 2 ed., 1987.
- [30] E. R. Bachmann, X. Yun, and C. W. Peterson, "An investigation of the effects of magnetic variations on inertial/magnetic orientation sensors," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '04*, vol. 2, pp. 1115–1122, Apr. 2004.
- [31] C. B. F. v. d. H. W.H.K. de Vries, H.E.J. Veeger, "Magnetic distortion in motion labs, implications for validating inertial magnetic sensors," *Gait & Posture*, vol. 29, no. 4, pp. 535–541, 2009.
- [32] Speake & Co Limited, "Autocalibration algorithms for FGM type sensors." Application note.
- [33] M. J. Caruso, *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*. Honeywell Inc., Solid State Electronics Center, Honeywell Inc. 12001 State Highway 55, Plymouth, MN 55441.
- [34] J. F. Vasconcelos, G. Elkaim, C. Silvestre, P. Oliveira, and B. Cardeira, "A geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame," in *Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, vol. 2, 2008.
- [35] D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, and B. W. Parkinson, "Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 87–102, 2006.
- [36] Vicon Motion Systems Limited., *Vicon MX Hardware*. 5419 McConnell Avenue, Los Angeles, CA 90066, USA, 1.6 ed., 2004.
- [37] Vicon Motion Systems Limited., *Vicon Nexus Product Guide - Foundation Notes*. 5419 McConnell Avenue, Los Angeles, CA 90066, USA, 1.2 ed., November 2007.
- [38] P. Martin and E. Salan, "Design and implementation of a low-cost observer-based attitude and heading reference system," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 7, pp. 712–722, 2010. Special Issue on Aerial Robotics.
- [39] X. Yun, E. R. Bachmann, H. Moore, and J. Calusdian, "Self-contained position tracking of human movement using small inertial/magnetic sensor modules," in *ICRA*, pp. 2526–2533, 2007.
- [40] E. Foxlin, "Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 25, no. 6, pp. 38–46, 2005.
- [41] H. M. Schepers, H. Koopman, and P. H. Veltink, "Ambulatory assessment of ankle and foot dynamics," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 5, pp. 895–902, 2007.
- [42] R. Stirling, K. Fyfe, and G. Lachapelle, "Evaluation of a new method of heading estimation for pedestrian dead reckoning using shoe mounted sensors," *The Journal of Navigation*, vol. 58, no. 01, pp. 31–45, 2005.
- [43] F. Cavallo, A. Sabatini, and V. Genovese, "A step toward gps/ins personal navigation systems: real-time assessment of gait by foot inertial sensing," pp. 1187–1191, Aug. 2005.