

高性能惯性检测解决方案 助力自主式机器应用

作者: Bob Scannell
ADI公司

无论是在制造业、农业、物流业、能源业、汽车业还是无人机行业，机械自动化都有望显著提高资源效率、设备精度和安全性。为实现这些效益，关键是找出合适的检测技术以增强对设备状况相关情境的了解，使得设备的地点或位置成为有价值的输入。对此，通过指出精确地点或维持精准定位，精密惯性传感器有望发挥巨大作用。在某些应用中，运动是一个重要因素，若将其位置信息和传感器情境信息相关联，将产生意义重大的价值。很多情况下，尤其是在复杂或恶劣环境下工作时，确定位置有着关键性作用。运动物联网(IoMT)在实现效率大幅提升的道路上还面临着许多挑战，高性能惯性传感器将对其发展起到重要的推动作用。

传感器推动机器自动化

机械设备已从执行简单的被动测量发展到包含嵌入式控制功能，现在正进军完全自主式运作，这其中传感器发挥着重要的推动作用。无论是支持离线分析的简单测量，还是过程控制，很多此类传感器在孤立环境下都能充分有效地工作。获取实时信息的需求，加上日益丰富的检测类型和高效处理，使传感器融合——通过它能够最有效地确定与多种应用和环境状态相关的情境——取得重要进步。此外，在涉及多平台交互和需要获

取历史系统状态的复杂系统中，连接技术的进步为智能程度日益提高的传感器系统提供支持，如表1所示。

表1 传感器集成和连接水平

传感器	单个基本检测元件
多传感器	识别多种检测类型以满足应用需求
融合传感器	利用一个传感器校正另一个传感器，或在传感器之间进行状态驱动的切换
智能传感器	本地化、嵌入式处理，支持实时分析和决策
互连传感器	通信链路支持跨平台信息共享
智慧传感器	利用跨时间信息（例如云和数据库）适应并学习变化

这些已面世的智能型传感器系统正在一些所谓的成熟行业掀起革命，把农业变成智能农业，把基础设施变成智能基础设施，把城市变成智能城市。由于传感器被部署在这些环境中以收集相关的情境信息，数据库管理和通信方面出现了新的挑战，不仅要求传感器之间的融合，而且要求实现跨平台、跨时间的复杂融合（例如：对跨时间的基础设施状况、前一年的农作物产量、交通状况及模式进行基于云计算的分析），如图1所示。

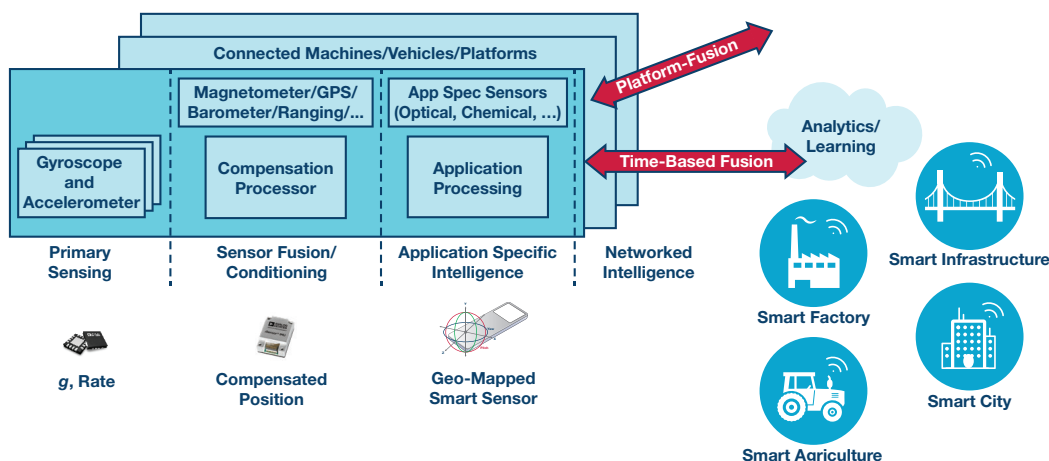


图1 面向地点感知型工业智能检测的集成

在机动性很重要的情况下，需要确定情境传感器数据的地理位置。事实上，物联网很少被视为静态。工厂、田野和医院中的可移动设备能发挥更大的用处，而地理位置不动的设备的光学传感器也可能需要局部移动，比如转向和对位。运动物联网（表2）能融合情境数据和位置数据，极大地提高数据的价值和效益。举个例子，当分析农作物增产的机会时，试着想象比较以下两种情形：一是对每颗所种种子的温度、湿度、精确位置都了如指掌，二是仅知道种子随机播撒的农地的温度和土壤条件；显然第一种情形更有利于做出准确分析。

表2. 精确定位与情境交融，实现运动物联网

物联网情境传感器		位置传感器		
温度	+	惯性	=	运动物联网
光学		GPS		
化学		磁力计		
气体		气压计		
振动		分布区域		
其它		其它		

智能机器中的惯性传感器

在大多数智能机器中，惯性传感器主要起到两个作用：一是设备稳定和瞄准，二是导航和制导，如图2所示（另一个重要作用是振动分析和条件监控，对此将单独说明）。GPS由于无处不在，可能被视为大多数系统的首选导航辅助手段，但在某些情况下，依赖GPS会带来一些严重问题，因为它可能会被阻挡。在GPS被阻挡期间切换到惯性检测是可行的，但要求惯性传感器质量足够好，并能在此期间提供足够高的精度。对于稳定或伺服环路，反馈机制可能要依赖惯性传感器，以使天线、吊车平台、施工刀片、农具或无人飞行器上的相机维持一个可靠的指向角。在所有这些例子中，惯性传感器的作用已不仅仅是提供有用的功能（如手机中的手势控制等），而是发展到要在异乎寻常的困难环境中提供关键精度或安全机制（参见表3）。

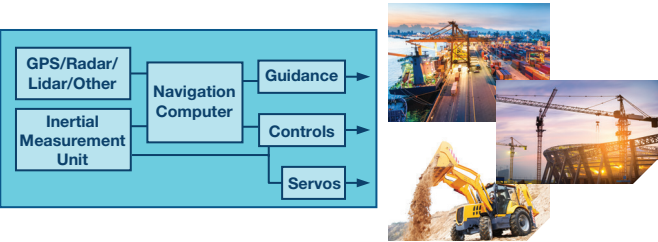


图2. 在其他传统传感器有局限性的应用中，惯性测量单元起到关键的稳定和定位作用

表3. 困难环境下的工业应用对惯性传感器提出极具挑战性的要求

主要挑战
在GPS被阻挡时提供分米级精度
即便在振动、极端温度、有风等状况下也能维持高精度
在所有条件下可靠安全地运作

传感器的质量非常重要

有一种不切实际的说法是，可以利用传感器融合算法，通过编程使技术水平很差的传感器获得良好的性能。传感器融合的确可用于某些校正，例如：利用温度传感器校正其他传感器的温漂，或利用加速度计(g)传感器校正陀螺仪的重力效应。但即使是在这些情况下，也只能依据环境来校准给定传感器，而无法提高它在校准点之间维持性能的固有能力；也就是说，只能插值而无法维持校准精度。质量较差的传感器通常会迅速漂移，如果不进行广泛和成本高昂的校准，精度会立即下降。

尽管如此，为使器件发挥最高性能，即使高质量传感器通常也需要进行一定的校准。为了以最具性价比的方式进行校准，必须了解传感器的复杂细节和运动力学的深厚知识（参见图3），更不用说需要比较独特的测试设备。因此，校准和补偿步骤越来越多地被看成是传感器制造商必须提供的嵌入式功能。

将基本检测输出转换为有用的应用级智能的第二个重要步骤是状态驱动的传感器切换。这就意味着要对应用动力学以及传感器性能有广泛深入的了解，从而最有效地在任一给定时间点确定可以利用和依赖的传感器。

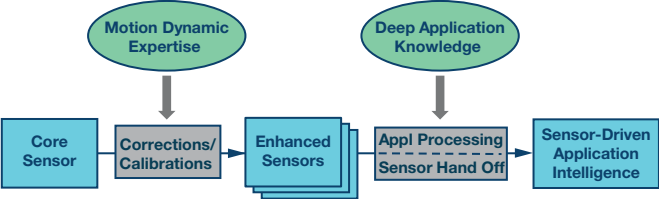


图3. 从惯性传感器提取有价值的应用级信息需要复杂校准和高级处理

图4中的概念示例说明了传感器融合在工业应用中的作用。这是一种精密从动工业应用，通过精心选择传感器来满足预期需求，在GPS有很大可能被阻挡，或在有复杂磁场和其他环境干扰的情况下保持运作。为此必须高度依赖无基础设施的惯性传感器，并选择其他传感辅助手段来应对特定环境挑战，帮助校正长期惯性漂移。虽然较好的做法是对传感器选择进行规划以实现所有条件下的精确跟踪，但这种做法在实际上是不可行的。因此，场景规划中仍存在一定的不确定性。已有算法来执行重要的传感器校准，以及管理应用状态驱动的复杂传感器切换。

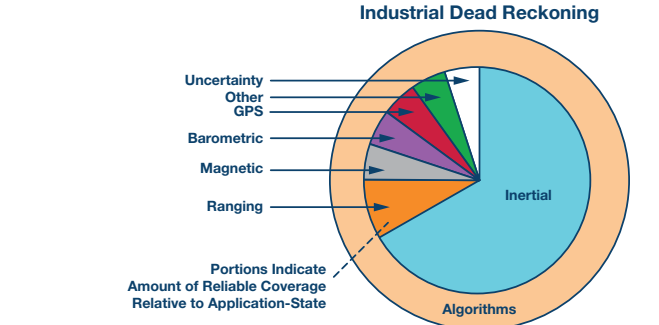


图4. 传感器融合算法依赖精密传感器，需正确选择以支持特定应用环境

归根结底，最终应用将决定所需的精度水平，而所选的传感器质量将决定其能否实现。

表4. 具有复杂、关键任务要求的工业应用依赖高精度传感器

惯性传感器质量	特性	在传感器融合中的作用	传感器融合之后的精度	适合于:
高精度	超低噪声, 在所有条件下稳定工作	主传感器, 受到高度依赖, 支持恶劣/无法预测的条件	$\sim 0.1^\circ$	复杂运动、长寿命、 任务关键型的使用场景
低精度	低到中等噪声, 稳定性差, 在振动和 临时冲击下的漂移不确定	权重较低的备用传感器, 可靠性有限或依赖于特定条件	3° 至 5°	简单运动、短寿命、 高容错性的使用场景

表4比较了两种场景，说明了传感器选择对设计过程和设备精度均很重要。如果只在很有限的情况下依赖传感器，并且应用有较高的容错性，那么可以使用低精度传感器。换言之，如果不是安全或生命攸关的应用，相对较低的精度便足够了。虽然多数消费级传感器在有利条件下噪声很低且性能良好，但它们不适合用于动态运动（包括振动）下的机器，因为性能较低的惯性测量单元无法将动态运动与简单的线性加速度或所需的倾斜测量区分开来。在工业环境中工作时，为实现优于1度的精度，应当选择专门设计的传感器，以便抑制振动或温度影响导致的误差漂移。这种高精度传感器能够支持更大范围的预期应用状态，工作时间也更长。

高性能惯性传感器

针对性能的设计与针对成本、尺寸、功耗效率的设计并不是互相排斥的。然而，以降低成本为主要目标的MEMS结构设计通常会牺牲性能，有时甚至会严重削弱性能。为降低成本而做出的一些简单选择，例如缩小硅片质量和用塑料封装消费级产品等，对MEMS性能有很大的不利影响。为了从微机电器件（例如图5所示）提取精确稳定的信息，必须有很高的信噪比，而信噪比是由硅片面积和厚度决定的，另外还要选择适当的器件封装和系统外壳，使硅片受到的应力最小。在一开始定义传感器时便牢记最终应用的性能要求，据此优化硅片、集成、封装、测试和校准方法，使得在复杂环境下也能维持原有性能，并且使成本最低。

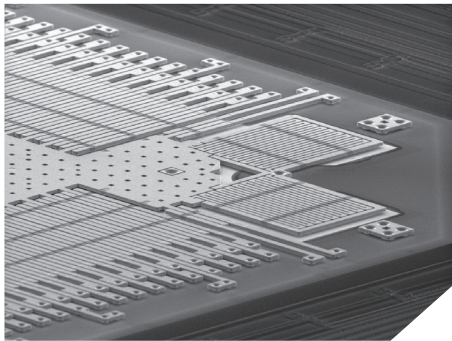


图5. 用于确定精密运动的微机电结构

表5显示了一款中档工业器件的性能，并将其与手机等设备使用的典型消费级传感器进行比较（注意还有更高端的工业器件，其性能比表中所示高出一个数量级）。多数低端消费级器件未提供诸如线性加速度效应、振动校正、角度随机游走之类的参数规格，而这些规格在工业应用中恰恰可能是最大的误差源。

这款工业传感器设计用于预期会有相对迅速或极端运动（2000 °/s、40 g）的场景，宽带宽传感器输出对最佳地辨别信号也很关键。工作期间的失调漂移（运动中稳定度）应最小，以降低对一大套补充传感器（用来校正性能）的依赖。在某些情况下，应用无法为后端系统滤波校正提供所需的时间，此时必须使开机漂移（可重复性）最小化。低噪声加速度计同陀螺仪一起使用，以帮助区别并校正任何g相关漂移。

陀螺仪传感器设计用来直接消除任何g事件（振动、冲击、加速度、重力）对器件失调的影响，可大幅改善线性g。通过校准，温漂和对准均得以校正。若不进行对准校正，典型多轴MEMS器件即使集成到单片结构中，也可能有较大对准误差，使其成为误差预算的主要贡献因素。

表5. 工业MEMS器件对所有已知潜在误差源进行全面测定，通常能实现高出一个数量级或更高的精度水平

参数	典型工业规格	单位	相对于典型消费级器件的改善
陀螺仪			
动态范围	最高 2000	°/s	~
噪声密度	0.004	°/s/√Hz rms	2×
角度随机游动	0.2	°/√Hr	2×
运动中稳定度	5	°/hr	3×
偏置重复性	0.2	°/s	100×
-3 dB 带宽	465	Hz	2×
加速度计			
动态范围	最高 40	g	3×
噪声密度	25	μg/√Hz rms	10×
速度随机游动	0.03	m/s/√Hr	10×
运动中稳定度	10	μg	10×
偏置重复性	25	mg	100×
-3 dB 带宽	500	Hz	2×
轴对齐	0.05	度	20×
线性加速度效应	0.01	°/s/g	10×
振动校正	0.004	°/s/g ²	10×
灵敏度温度系数	25	ppm/°C	10×
偏置温度系数	0.007	°/s/°C	10×

Consumer Grade MEMS	Industrial Grade MEMS
- Compromised Performance - Added Cost from Test/Calibration/Yield Loss - Added Cost of Complex Packaging, Vibration/Thermal Isolation - Software Band Aids - Life Cycle Performance Drifts from Plastic Packaging - Component Obsolescence - Compromised Reliability ... Operational Failure	- Superior Performance - Ruggedized, Application-Ready - Stability: Performance and Supply/Availability - Reliability: Up to Full Avionics Certifiable (DO178/254) - Lower Overall System Size/Weight/Power/Cost



图7. 消费级器件虽然成本较低，但系统层面的必要开销较高，最终会影响可靠性和性能

近年来，噪声在区分传感器级别上所起的作用有所降低。在超出简单判定或相对静止运动确定的应用中，线性 g 效应对准误差之类的参数成为噪声源，通过芯片设计方法或器件专用校准来改善它们需要付出高昂的成本。表6中的使用案例比较了实际工业MEMS IMU和消费级IMU，二者均有比较好的噪声性能。然而，消费级器件并未针对振动或对准进行设计或校正。基于给出的假设，本例显示了器件规格及其对误差预算的影响。总误差为所示三个误差源的和方根，消费级器件的误差以线性 g 和跨轴（对准误差）为主，工业器件则实现了更好的平衡。最终，不考虑耐用性较差消费级产品的其他潜在误差源的话，二者性能相差至少20倍。

表6. 在动态运动中，线性 g 和对准是主要误差源；工业器件平衡了所有规格以使总误差较低

抖动 = (噪声 + 振动 + 跨轴灵敏度) 的和方根

示例IMU的主要规格	工业		消费级	
性能	规格	影响	规格	影响
噪声密度 ($^{\circ}/\text{sec}/\sqrt{\text{Hz}}$)	0.004	0.036	0.0100	0.089
线性 g ($^{\circ}/\text{sec}/g$)	0.01	0.020	0.100	0.200
跨轴 (%)	0.09%	0.090	2.00%	2.000
预测误差 ($^{\circ}/\text{sec}$)		0.099		2.012*

假设条件: 50 Hz带宽, 2 g rms振动, 100 $^{\circ}/\text{s}$ 离轴旋转

*最佳情况: 未包括其他漂移因素

系统权衡

大部分复杂运动应用需要一个全功能IMU（三轴线性加速度和三轴角速率运动）来实现充分有效的定位。当今的IMU既有芯片式（消费级），也有模块式（工业级），参见图6中的工业IMU示例。逻辑上看，消费级芯片式IMU的系统集成度似乎更高，但如果最终目标是在复杂的工业环境中精确定运动状况，则情况正好相反。工业IMU性能优越，而且开箱即可使用。在应用的全寿命期间都能可靠地获得一致的高性能，对系统中校正的要求（如有）极低。消费级IMU看似全面集成且很完整，但其实需要

大量额外时间、集成和成本（参见图7）才能勉强实现类似水平的性能（通常几乎是不可能的），而且可能永远无法实现同样可靠的运作。

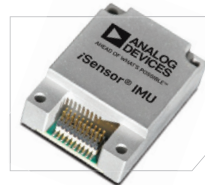


图6. 6自由度惯性测量单元ADIS16460，在复杂和动态环境中也能提供高精度水平

地点感知型工业智能传感器有望大幅提升机器自动化的效率。系统的精度和可靠性主要取决于核心传感器质量，而不是其周围的系统和软件。尽管如此，围绕高质量传感器的整体集成、嵌入式软件和连接方法可帮助实现智能检测解决方案，从而大大增强信息的质量和利用率，同时又不影响同样重要的安全和可靠性。

作者简介

Bob Scannell是ADI公司MEMS惯性传感器产品的业务开发经理。他在ADI公司工作已超过20年，先后从事传感器、DSP、无线产品的各种技术营销和业务开发工作。之前他曾在Rockwell International公司从事设计和市场方面的工作。他拥有美国加州大学洛杉矶分校电气工程学士学位和美国南加州大学计算机工程硕士学位。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。



请访问 ezchina.analog.com

全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路2290号展想广场5楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区西小口路66号
中关村东升科技园
B-6号楼A座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路889号光谷国际广场
写字楼B座2403-2405室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA15281sc-0-11/16

analog.com/cn

