

# 高性能惯性传感器助力运动物联网

Bob Scannell  
ADI公司

在激增的高质量传感器、可靠连接和数据分析的共同推动下，工业效率迈上了新的台阶，而不断提高这些智能节点的自动化和移动化程度也能带来好处。在这些情况下，对传感器节点进行精密运动捕捉和位置跟踪成为事关应用成败的核心。这样，智能农场就可以基于丰富的地理位置、传感器内容以及分析学习结果来联合利用自动化地面车辆和航空器更加有效地指导地面作业。智能手术室将经典的导引技术带到手术台上，供精密制导机械臂使用，其运用传感器融合技术来确保各种条件下的精准导引。在多个领域，基于运动的传感器成为移动应用的价值倍增器。

手机中普遍存在的消费类惯性传感器使人们对其精度普遍感到失望，因此，在推动运动物联网(IoMT)的概念方面，迄今都没有什么成效。然而，新型高性能工业传感器能支持精确的角度指向和精确的地理定位性能，同时还能达到必要的尺寸和成本效率要求，故而现在又做好了推动运动物联网发展的准备。

## 工业系统智能检测的推动因素

工业机械和流程最具价值的进步集中在有形的系统级优势上，而这通常会带来设计和实现方面的挑战，这些挑战又会发展成新的问题解决方案和业务模式。这种系统级推动因素可以归纳为三项追求，即对资源效率、关键精度和更高安全性的追求。瞄准这些横跨多个行业的改进的应用，包括跨越空中/地面/海上、室内/室外、短期/长期和人/机等，但无论如何，它们都依赖于共同的属性：即精度、可靠性、安全性和智能处理与分析，如表1所示。

多种类型的传感器成为目标应用设计任务的核心。目标设计涉及的系统复杂性要求基于广泛变化的条件下慎重考虑传感器质量和鲁棒性。虽然有些行业有可能出于方便考虑而选择传感器（比如，利用手机上已经存在的传感器组合），但其他行业则会重新设计传感器组合，根据精度做出选择，将传感器智能地结合起来，以全面、可靠地覆盖目标系统状态。

表 1. 运动物联网应用重要的系统属性转变成极具挑战性的设计需求

系统推动因素	应用示例	关键需求
资源效率	精密农业；库存 / 资产控制；工业监控；设备预防性维护	多参数检测；地理定位；数据库入库 / 引用
关键精度	工厂机器人；手术器械；建筑；车辆导航	精密；稳定性；可重复性；全工况运行
改进安全性	无人驾驶车辆；条件监控；自动机器；急救人员	可靠性；环境免疫力；耐用性；预测分析；故障安全模式

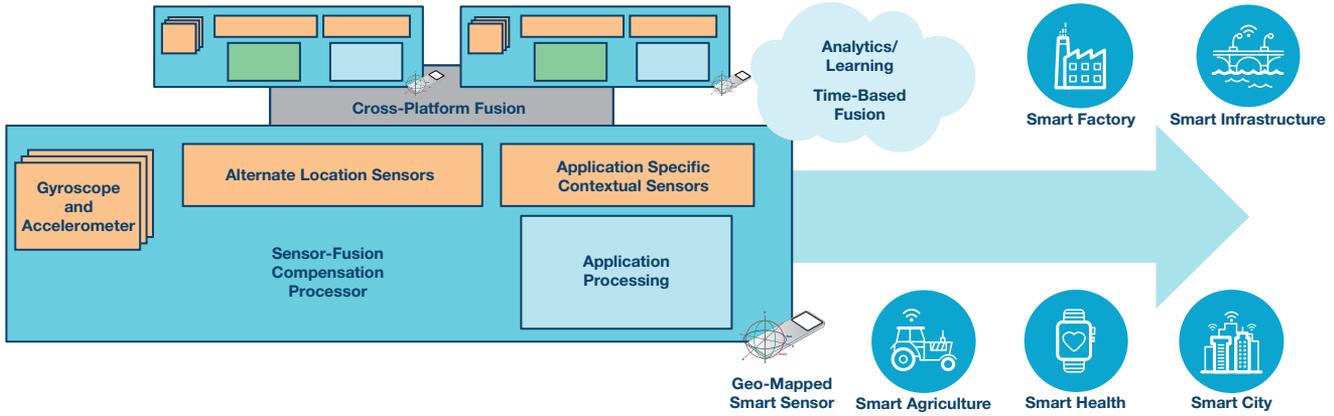


图1. 新兴工作要求将情境和运动检测与多层融合结合起来。

### 智能检测

在传感器大量存在的背景下，这些已面世的智能型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数据融合，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、交通状况及模式等进行基于云计算的分析），如图1所示。

从设备和环境中可靠地抽取哪些信息的决定成为这些新兴应用最终效用和发展前景的主要度量指标。精度驱动效率，进而转变成必要的经济因素，同时也是确保安全、可靠运行的关键。虽然多数基础传感器可以添加简单的功能，但添加的这些简单功能却无法满足不同目标运动物联网应用的需求，在这类应用中，是/否、上/下、开/关等状态会被更精细的分辨率代替，添加的功能会影响传感器的选择。

### 运动的重要之处

多数情况下，物联网都处于运动状态。即使不处于运动状态——比如，静止的工业安全摄像头——精密指向仍可能必不可少，或者，关于无用运动（篡改）的知识也可能非常有价值。如果能在恶劣的飞行条件下维持精确的指向角度，用光学载荷捕捉作物图像的无人机就有可能更快地带来更好的结果；如果能为光学数据提供准确的地理测绘信息，则有可能实现对数据和趋势的历史比较。智能交通工具，无论是地面交通工具，还是空中或海上交通工具，它们都越来越依赖GPS导航。然而，GPS遭受的精度压力也越来越大，无论是有意为之，还是自然使然（建筑物、树木、隧道等）。如果选择时考虑了精度需求，则额外的传感器仍然可以在事故中断期间可靠地进行航向角推算。表2列出了使IoMT（运动物联网）中的M（运动）概念名符其实的一些因素，注意运动与通用应用之间的关系。

表 2. 运动知识、甚至运动知识的缺乏都事关多种应用的成败

工业设备	运动相关性
智能拖拉机	地理定位、天线稳定
无人机	地理定位、群集、载荷指向
急救人员	地理定位、测绘、运动监护仪
高价值资产	地理定位、库存控制
火车、其他交通工具	地理定位、安全性
增强现实	地理定位、指向
智能交通工具	地理定位、传感器定位、动态
机器人、机械	地理定位、控制、稳定
天线、摄像头	指向角度、安装/校准、稳定

如果有机会和手段捕捉设备或人的自然惯性，抽取的系统状态意义就会得到增强，并且可能与可用的情境信息适当地融合起来，如表3所示。

表 3. 位置检测是物联网的价值倍增器

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

### 可靠、安全的运动物联网节点

运动物联网节点输出的有效性和价值最为依赖的是核心传感器的质量以及它们高保真地捕捉应用情境的能力。因此，融合处理是传感器校正/增强的必然选择，也是理想捕捉传感器间状态动态的必备条件（例如，在任意给定时间点，哪个传感器最可靠）。应用级的处理以分层方式融入解决方案之中，并根据环境特点进行优化，包括适当的边界条件。虽然这种方式是自动的，但在有些情况下，这些节点会协同工作，比如在地面或空中成群的无人驾驶交通工具中。在这些情况下会部署安全链路，强调可靠传输和受保护的特有身份信息，如图2所示。

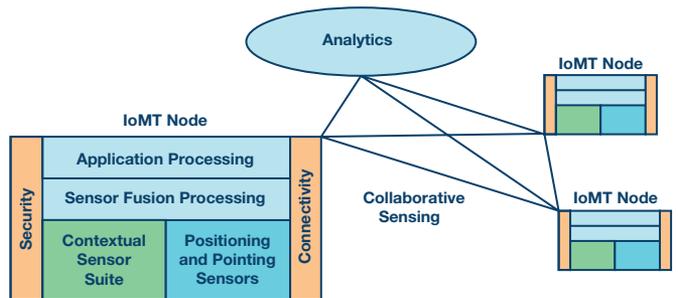


图2. 综合情境和位置信息的互联安全传感器。

表 4. 以高质量传感器为基础，日益提升的集成度和智能程度推动自动化和人机融合

		测量	控制	自动化	人机融合
传感器	单个基本检测元件	•			
多传感器	识别多种检测类型以适应应用需求	•			
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	•	•	•	
智能传感器	利用跨时间信息（例如云和数据库）适应并学习变化	•	•	•	•

表 5. 推动精度和效用的是传感器的质量而非传感器融合的复杂性

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	适用于:
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	~0.1°	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

## 传感器是自动化的核心

就如人体一样，自动运动物联网节点依赖检测多个输入来实现需要的感知能力，从而独立行动并根据随机、甚至乱序事件优化其结果，最终随时间改进。如表4所示，从基本测量到控制、再到自动化的过渡会提高传感器融合层的复杂性以及嵌入式设备计算的复杂性。由于这些节点也会取得很高的互联能力和自适应学习能力，所以他们可能走向人机融合。

## 没有基础设施的定位

GPS无处不在，除非卫星信号被阻挡或中断。在可用的条件下，无线测距技术可能非常精确。如果未受干扰，始终都有磁场读数。惯性具有独有的自特性。显然，惯性MEMS传感器有自身的不足（漂移），但这些不足都在可控范围以内，采用小尺寸经济型封装的新型工业惯性测量装置(IMU)具有前所未有的稳定性。

惯性MEMS器件采用标准半导体工艺、复杂封装和集成模式，通常以线性加速度( $g$ )或角速度( $^{\circ}/\text{秒}$ ，或速率)为单位，直接检测、测量和解读其运动，如图3所示。由于除要求最温和的应用以外，所有其他应用都拥有所谓的多自由度（实际上指，可以在任何所有轴上运动，且所有设备在其运动中都相互不受限），这就必须捕捉 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 轴的加速度和角速度值；或者在有些情况下，称为翻滚轴、俯仰轴和偏航轴。综合起来，这些有时被称为六自由度惯性测量单元。

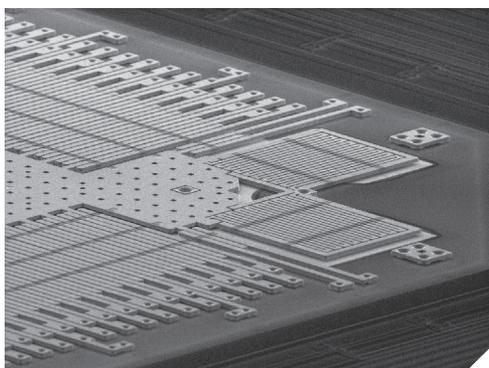


图3. 用于确定精密运动的微机电结构。

虽然经济上的考量自然会促使MEMS设计师用最少的硅片面积在各个轴上( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )抽取这些多个检测类型(加速度、角速度)，但仍然需要采取更加平衡的性能设计视角，以满足更具挑战性的工业检测需求。事实上，有些MEMS结构在尝试用单个MEMS模块测量所有6种模式。在考察这种方式对于高性能检测的有效性之前，我们必须知道，MEMS器件需要捕捉一些运动，这非常重要，但同样重要的是，同一器件还要能够放弃会变成误差的其他形式的运动(或者不受其影响)。例如，虽然陀螺仪测量角速率，但它同样应该能做到忽略角速率测量上的加速度或重力效应。对一个简单的MEMS器件来说，如果试图以小小的结构测量一切，自然(在设计上)会非常容易受到这些其他干扰误差源的影响，并且无法把有用运动与无用运动区分开来。最终，这些误差源会变成导航或应用中的噪声和误差。

运动物联网要兑现必要时提高资源效率、增加安全或关键精度的承诺，就需要比当今移动设备中无处不在的简单传感器具有更高的精度。着眼于性能的设计模式就变成了为每种检测模式和每个检测轴独立设计的模式，但其目的是走向融合和集成。最后，必须知道的是，为性能设计并不一定意味着不能为经济考量而设计。

## 功能或性能

有些应用可以通过添加功能(设备的手势/方向模式切换)获得极大的价值，用简单的MEMS器件就能相对容易地获得这些信息。工业或专业器件可能更容易测量不同方位的精度与亚度间的差值，或者能以优于一个数量级以上的精度分辨位置，同时还能在高振动环境里工作。低端传感器与高端传感器之间的性能差异并不小，事实上，二者的差异非常大，在选择组件时有必要慎重考虑。

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5选择了两种解决方案进行比较，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。

**表 6. 工业 MEMS 器件对所有已知潜在误差源进行全面测定,通常能实现消费类器件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
<b>陀螺仪</b>			
动态范围	最高 2000	°/sec	~
噪声密度	0.004	°/sec/√Hz rms	2×
角度随机游动	0.2	°/√Hr	2×
运动中稳定度	6	°/hr	3×
偏置重复性	0.2	°/sec	100×
-3 dB 带宽	465	Hz	2×
<b>加速度计</b>			
动态范围	最高 40	g	3×
噪声密度	25	μg/√Hz	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×
<b>轴对齐</b>			
线性加速度效应	0.01	°/sec/g	10×
振动校正	0.004	°/sec/g <sup>2</sup>	10×
灵敏度温度系数	25	ppm/°C	10×
偏置温度系数	0.007	°/s/°C	10×

精密仪器设计师最感兴趣的一般是惯性测量装置(IMU),这类装置输出的是经校准的加速度和速率而非运动角度或距离,因为这种系统级的信息高度依赖于具体应用,因而是系统设计师而非惯性传感器设计师的工作重点。结果导致的问题,举例来说,是从惯性传感器规格表中分辨指向精度。

表6展示的是一款中端工业器件的规格,同时还用手机中常见的消费级传感器进行了比较。请注意,也有更高端的工业器件可用,其精度比表中所示器件要高一个数量级。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。

这款工业传感器样品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,以降低对更多补充传感器(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关于加速度的漂移。

陀螺仪传感器设计可用来直接消除任何加速度g事件(振动、冲击、加速度、重力)对器件失调的影响,可大幅改善线性加速度;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,使其成为误差计算的主要贡献因素。

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,线性加速度效应和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。

### 传感器融合能补救劣质传感器吗?

答案很简单,不能。传感器融合是一个滤波和算法处理的过程,它将相对于环境、运动动态信息和应用状态对传感器组合进行合并或管理。传感器融合可以提供确定性的校正(如温度补偿),并会基于系统状态知识,管理从一个传感器到另一个传感器的切换过程,但无法弥补传感器内在的缺陷。

在传感器融合设计中,最关键的任务是首先要深入挖掘应用状态知识,为设计流程的剩余环节提供支撑和动力。针对给定的应用选择适当的传感器时,应先进行详细分析,了解其在总体任务的不同阶段中的权重(相关性)。在行人导航定位推算示例中,解决方案主要取决于可用的设备(如智能手机中的嵌入式传感器),而不是通过性能设计。因此,会严重依赖GPS以及其他可用的传感器,例如嵌入惯性和磁性传感器,仅为确定有用的位置信息发挥一小部分作用。它在室外能够正常工作,但在具有挑战性的城市环境或室内,GPS就不准确了,其他可用传感器的质量很差,存在较大差距,换言之,位置信息的质量具有不确定性。尽管先进的滤波器和算法通常用来融合这些

传感器的数据, 无需任何额外传感器或质量更好的传感器, 软件对于弥补不确定性差距的作用不大, 最终只是大大降低了报告位置的信心。图4中为概念性说明。

与其形成鲜明对比的是, 工业导航定位推算方案是针对系统性能定义而设计的, 要根据具体精度要求选择组件。更高质量的惯性传感器允许其发挥主要作用, 适当利用其他传感器来缩小不确定性差距。比起推算/估算可靠的传感器读数间的位置, 算法在概念上更关注最佳权重、切换和传感器互补, 以及对于环境和实时运动动力学的认识。

精度在任何一种情况下都可以通过选择质量更高的传感器来提高, 虽然传感器滤波和算法是解决方案的重要一部分, 但它们本身并不能消除低质传感器覆盖范围的差距。

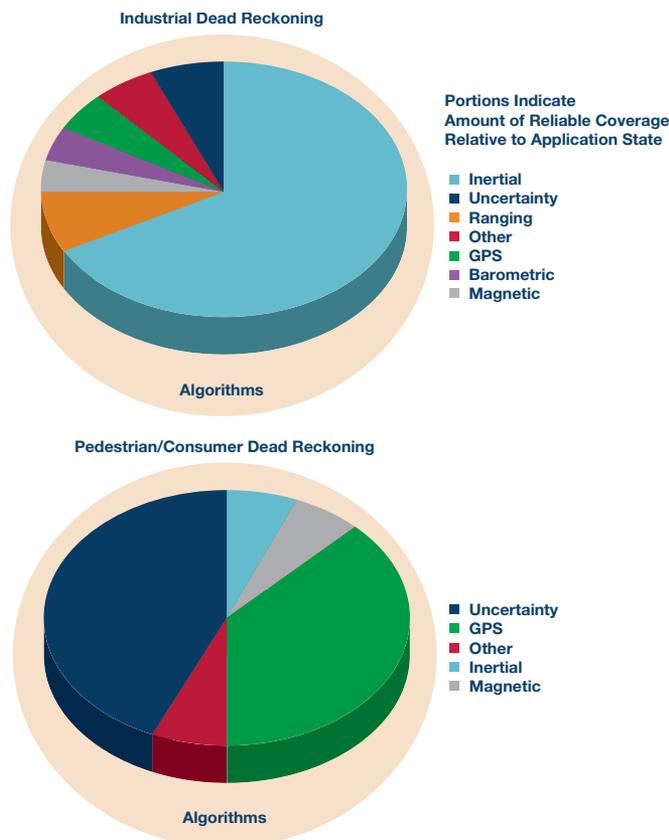


图4. 应用级精度取决于传感器质量而非传感器融合复杂性。

新型工业传感器的性能已经接近以前用于导弹制导的传感器的水平。这些新型工业传感器采用最初针对可靠和精密汽车应用设计并以经济型工艺制成的架构, 在性能-成本比和性能-尺寸比方面具有独特的优势, 如图5所示。

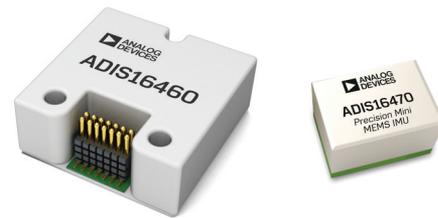


图5. 工业级6自由度IMU ADIS1647x和ADIS1646x, 在复杂和动态环境中也能提供高精度水平。

精密运动检测不再是小众应用的专属, 其他应用也别无选择, 只得投资采购昂贵的跟踪解决方案。随着迷你型IMU工业级精密传感器的上市, 物联网设计师现在可以通过整合优质运动检测功能和嵌入式情境检测功能, 成倍提高其产品的价值。

## 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](http://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**

深圳市福田中心区  
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

©2017 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.  
TA15955sc-0-6/17

[analog.com/cn](http://analog.com/cn)



超越一切可能™