

- **本周关注：福斯达、奥普光电、冰轮环境、三花智控**
- **本周核心观点：关注业绩预期表现较好的出口链及人形机器人**
- **视觉传感器：人形机器人中主要采用立体视觉与 TOF 法。** 1) 当前主流的视觉方案分为飞行时间 (TOF) 法、立体视觉法、结构光法。**飞行时间法 (TOF)** 主要利用信号在两个被反射面之间往返的飞行时间来测量节点间的距离，**结构光法**通过投影仪向目标物体投射具有特殊结构的图案并使用另一个相机去观察在三维物理表面成像的畸变情况，**立体视觉法**指从不同的视点获取两幅或多幅图像重构目标物体 3D 结构或深度信息，目前立体视觉 3D 可以通过单目、双目、多目实现。2) 综合分析**特斯拉、优必选、小米、波士顿动力**，**综合成本与性能考虑**，目前人形机器人中主要采用 **TOF 法与立体视觉法**。**特斯拉 Optimus 机器人**的 3D 传感模块以多目视觉为主，**优必选 WALKERX** 采用基于多目视觉传感器的三维立体视觉定位，**小米**发布的 CyberOne 机器人所搭载的 Mi-Sense 深度视觉模组是由小米设计，欧菲光协同开发完成，而据欧菲光公开的资料，其机器视觉深度相机模块主要由 iToF 模组、RGB 模组、可选的 IMU 模块组成。**波士顿动力**的 Atlas 头部有两个摄像头其中一个为 TOF 深度相机。
- **视觉传感器分为消费级与工业级，不同情形下单价有差异。**消费级 3D 视觉方案对于精度的要求更低，对成本的控制更为严格。以奥比中光披露的数据作为参考，其整体产品对 B 端的平均售价在 100-1000 元，C 端零售价在 1000-2000 元，主要产品系列为 TOF 方案，以及单目/双目+结构光的组合方案。工业级机器视觉由于各厂商内部情况和应用场景不同，定制化程度更高，对技术、精度、稳定性等的要求也更高，工业中的机器视觉单元主要由**工业相机、图像采集卡、图像处理器**构成。以埃科光电披露的数据作为参考，2D 工业线扫相机单价约 6000 元，2D 工业面扫相机的单价约 3.6 万元。工业相机主要由光源、镜头、图像传感器组成，图像采集卡承担着连接着工业相机与图像处理器的功能。同样根据埃科光电的采购数据，图像传感器单价约 3000 元，图像处理芯片的价格约 500 元，而搭配使用的图像采集卡价格约 3000 元。
- **IMU 传感器：人形机器人借助实现定位、平衡及姿态检测。**综合分析 **UCLA 论文、特斯拉、波士顿、小米**，目前人形机器人中需要采用 IMU，IMU 惯性传感器采集的角速度与加速度等惯性信息可以用于推算人形机器人的实时位置与运动轨迹，同时可以与机器人搭载的多传感器融合，在数据类型和数据频率间实现互补。同时根据精度要求，IMU 可分为消费级、工业级、战术级，根据原理的不同也可分为 MEMS IMU，光纤 IMU，其中自动驾驶或人形机器人一般采用工业级的 MEMS IMU 即可，其价格带在数百元至数千元。
- **IMU 难点主要在解决误差和提高精度。**MEMS IMU 的误差一是来源于惯性传感器自身的误差，二是 IMU 在集成过程中产生的误差。而上述两种误差又可分为系统误差和随机误差。其中系统误差主要有**零偏误差、非正交误差、非线性误差、温度误差**等、除去解决每种系统误差的方法外，随机误差也可以通过后期算法校准，通常采用 **Allan 方差法**，这也是壁垒之一。
- **投资建议：**建议关注有相关 IMU、视觉传感器及核心零部件布局公司**芯动联科、华依科技、奥比中光、埃科光电 (新股)**。
- **风险提示：**人形机器人需求不及预期、量产技术路线中对传感器精度需求较低导致单价波动。

## 推荐

维持评级



## 分析师 李哲

执业证书：S0100521110006  
电话：13681805643  
邮箱：lizhe\_yj@mszq.com

## 分析师 罗松

执业证书：S0100521110010  
电话：18502129343  
邮箱：luosong@mszq.com

## 相关研究

- 1.一周解一惑系列：核电阀门需求空间几何？-2023/07/09
- 2.一周解一惑系列：半导体封装测试设备及市场空间梳理-2023/07/02
- 3.一周解一惑系列：丝杆与直线导轨：高精度直线运动核心部件-2023/06/26
- 4.机器人的进化与觉醒——人形机器人执行&传感机构探讨-2023/06/24
- 5.一周解一惑系列：多领域散热材料、工艺的发展历史与路径演绎-2023/06/19

# 目录

<b>1 机器视觉方案介绍</b>	<b>3</b>
1.1 走进机器视觉产业	3
1.2 机器视觉方案	4
1.3 机器视觉市场空间	9
<b>2 机器视觉产业链上游介绍</b>	<b>10</b>
2.1 相机分类及标准	10
2.2 机器视觉上游零部件介绍	12
2.3 机器视觉部件单价一探	14
<b>3 惯性导航方案</b>	<b>17</b>
3.1 IMU (惯性测量单元) 介绍	17
<b>4 惯性导航在自动驾驶和人形机器人领域的应用</b>	<b>20</b>
4.1 高精度惯导为 L2.5+ 自动驾驶刚需	20
4.2 人形机器人借助 IMU 实现定位、平衡及姿态检测	22
<b>5 IMU 技术难点重在解决误差和提高精度</b>	<b>23</b>
5.1 惯性传感器中存在系统误差和随机误差	23
5.2 光纤陀螺仪技术难点	24
5.3 MEMS 陀螺仪与 IMU 技术难点	24
5.4 误差补偿的途经：算法与校准	28
<b>6 IMU 市场空间</b>	<b>30</b>
<b>7 风险提示</b>	<b>32</b>
<b>插图目录</b>	<b>33</b>
<b>表格目录</b>	<b>33</b>

# 1 机器视觉方案介绍

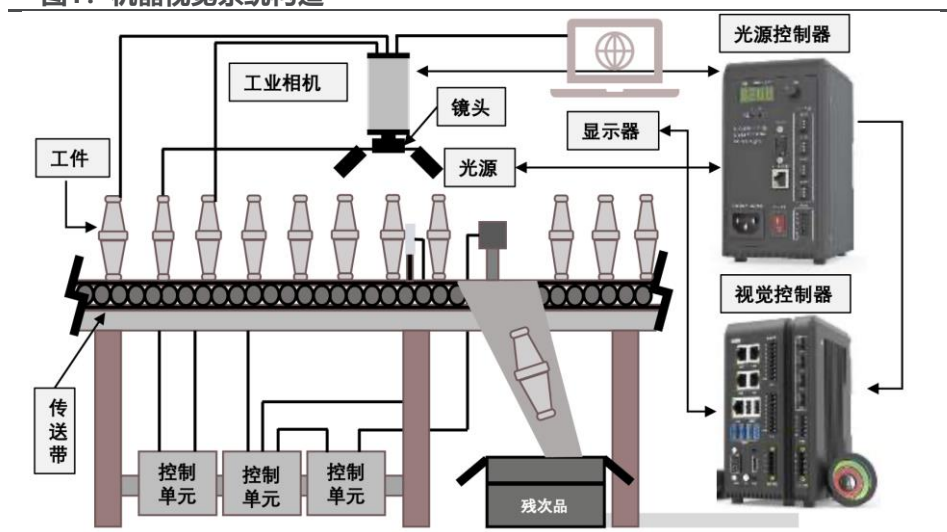
## 1.1 走进机器视觉产业

机器视觉系统是指用计算机来实现人的视觉功能，即用计算机来实现对客观的三维世界的识别。人的视觉系统是一个三维采样系统，三维物体的可见部分投影到网膜上，人们按照投影到视网膜上的二维的像来对该物体进行三维理解。所谓三维理解是指对被观察对象的形状、尺寸、离开观察点的距离、质地和运动特征（方向和速度）等的理解。机器视觉由此衍生而来，是一个“光、机、电、算、软”等技术高度集成的系统。一个完整的机器视觉系统包括：照明光源、光学镜头、相机、图像采集卡、图像检测软件、监视器、通讯单元等。

### 1.1.1 机器视觉工作原理与功能

机器视觉工作原理主要为通过包括工业相机与工业镜头的机器视觉产品捕捉被检测物品的图像，并将其信息转换为图像信号，随后将传送至图像处理系统的亮度、颜色以及尺寸等信息转化为数字信号，机器视觉系统最后将此类信号进行计算以抽取目标特征并利用其运算结果控制现场设备。

图1：机器视觉系统构造



资料来源：《2022 年中国机器视觉产业发展白皮书》，民生证券研究院

机器视觉在智能制造领域应用广泛，按功能主要分为四大类：定位、识别、测量、检测，目前在工业应用中以检测功能为主。

**表1：机器视觉的四大功能**

功能	介绍	在工业应用场景占比
定位	机器视觉应用的第一步是根据一定的模板在相机视野中找到相对应的对象或特征，关注对象的定位是否符合相应标准。如模式匹配软件工具无法精确定位图像中的零件，则无法进行识别、引导、检测或测量。定位功能主要应用于加工设备工具端的路径引导，是工业机器人重要的辅助性功能。	16%
识别	首先，光学字符识别(OCR)系统通过工业相机扫描对象或特征，传输至 PC 主机；然后，由字符验证(OCV)系统确认相对应的字符串是否存在。此外，机器视觉系统还可以通过定位具体图案来识别零件种类或根据颜色、形状识别物品。在工业应用场景中，物流标签读取和字符识别是识别功能最直接的服务对象。	24%
测量	测量距离和位置以评估是否符合规格。测量应用中的机器视觉系统可以计算并测量对象上两个点、多个点甚至几何位置之间的距离以确定这些测量是否符合规格。如不符合标准，视觉系统向机器控制器发送失败信号，触发拒绝机制，并将对象从生产线上弹出。在工业应用场景中，测量功能主要应用于对目标物体的高速、高精测量，特别适合复杂形态测量。	10%
检测	是对识别、测量、定位功能的集成和深度应用，主要表现为通过使用机器视觉技术对目标物体进行缺陷检测，在产品质量一致性控制和成本控制上发挥着重要作用。	50%

资料来源：《中国工业机器视觉产业发展白皮书（2021）》，民生证券研究院

## 1.1.2 机器视觉产业链

机器视觉产业链上游为光源、工业镜头、工业相机等核心硬件及图像处理软件的供应商；中游为产业链核心价值环节，以工业视觉设备厂商、系统厂商、综合视觉厂商为主；下游应用领域众多，包括电子、汽车、半导体、机器人、医疗设备等。

**产业链上游的工业镜头相机、图像采集卡等核心零部件与算法软件是机器视觉价值最高的部分，其成本占据工业视觉产品总成本的 80%。**尤其是在工业镜头、工业相机、底层软件系统等技术壁垒高、利润率高的部分，康耐视和基恩士等国外企业有着深厚的研发技术积累，具备软硬件的技术优势，占据了绝大部分市场，且毛利率较高。国产工业镜头目前在光学指标上已经具备一定竞争力，整体市场发展迅速，虽然大多厂商体量较小，但性价比优势明显，且镜头制作工艺已经能够满足视觉系统的基本需要，降低成本、国产化替代势头愈猛。

## 1.2 机器视觉方案

### 1.2.1 机器视觉的主流方案

工业机器人的视觉对其移动、操作有着重要决定作用，机器人手眼系统在工业领域有着广泛应用。根据成像单元安装方式不同，机器人手眼系统分为两类：固定成像单元眼看手系统（Eye-to-Hand）和随动成像单元眼在手系统（Eye-in-Hand or Hand-Eye）。眼看手系统是将视觉成像单元安装在本体之外的固定位置，不随机器人移动的一种系统，具有视线全面、控制简单、抗震性能好、姿态估计稳定等优点，但也存在分辨率低、容易产生遮挡问题等缺点。眼在手系统顾名思义即为视觉成像单元安装在机器人手臂末端的系统，摄像头随机器人一同移动，尽管会产生机械臂遮挡成像的问题，但有着空间分辨率高、有效克服标定误

差等优点。有些场合也会采用两者混用的协同模式，通过眼看手系统负责定位，用眼在手系统负责定向和高精度操作。

除了根据位置进行分类，不同的原理也衍生出了不同的方案。**3D 视觉是机器人感知的最先进、最重要的方法，可以分为光学和非光学成像方法。**目前应用最多的方法是光学方法，包括：飞行时间法、结构光法、激光扫描法、莫尔条纹法、激光散斑法、干涉法、照相测量法、激光跟踪法、从运动获得形状、从阴影获得形状，以及其他的 ShapefromX 等。

**飞行时间法 (TOF)** 主要利用信号在两个被反射面之间往返的飞行时间来测量节点间的距离，精度为厘米级，原理简单，模块体积小，测量距离范围较大，抗干扰能力较强。直接 TOF (D-TOF) 是探测器系统在发射光脉冲的同时启动探测接收单元进行计时，当探测器接收到目标发出的光回波时，探测器直接存储往返时间，通过光飞行时间测算目标距离，常用于单点测距系统。为了实现面积范围 3D 成像，通常需要采用扫描技术，无扫描 TOF 三维成像技术直到近几年才实现。间接 TOF (I-TOF) 方案中，时间往返行程是从光强度的时间选通测量中间接外推获得的，不需要精确的计时，而是采用时间选通光子计数器或电荷积分器，它们可以在像素级实现。I-TOF 是目前基于 TOF 相机的电子和光混合器的商用化解决方案。

**结构光投影三维成像目前是机器人 3D 视觉感知的主要方式。**结构光成像系统是由若干个投影仪和相机组成，常用的结构形式有：单投影仪-单相机、单投影仪-双相机、单投影仪-多相机、单相机-双投影仪和单相机-多投影仪等。结构光投影三维成像的基本工作原理是：通过投影仪向目标物体投射具有特殊结构的图案（如离散光斑、条纹光、编码结构光等），使用另一个相机去观察在三维物理表面成像的畸变情况，再通过图像处理和视觉模型求出目标物体的三维信息。根据结构光投影次数划分，结构光投影三维成像可以分成单次投影 3D 和多次投影 3D 方法。

图2: iTOF 成像原理

图3: 结构光投影三维成像图示

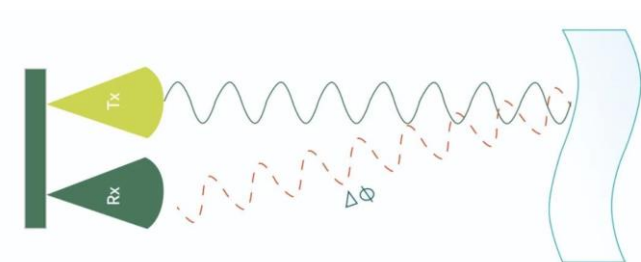
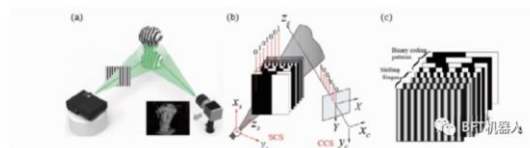


图: 多次投影3D成像 (a) 多次投影3D系统结构示意图; (b) 二进制格雷码投影3D基本原理; (c) 二进制格雷码+正弦相移混合编码投影3D



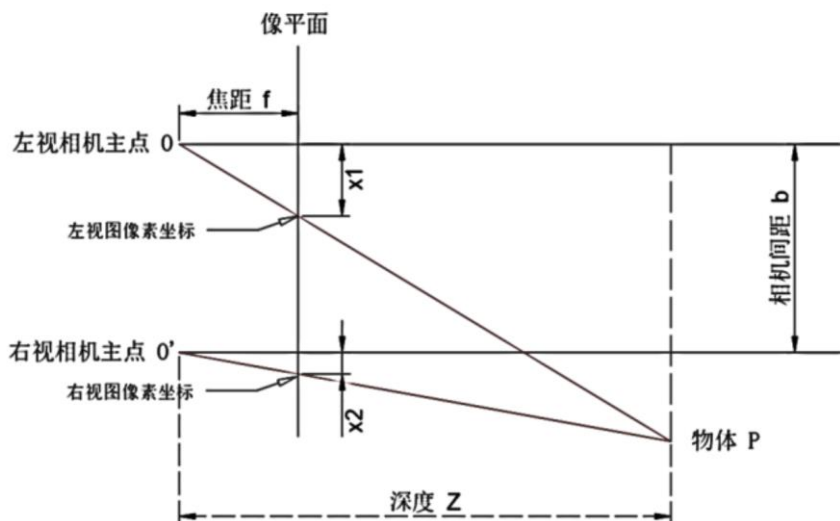
资料来源: 欧菲光, 民生证券研究院

资料来源: BFT 机器人, 民生证券研究院

立体视觉字面意思是用一只眼睛或两只眼睛感知三维结构，一般情况下是指从不同的视点获取两幅或多幅图像重构目标物体 3D 结构或深度信息。目前立体视觉 3D 可以通过单目视觉、双目视觉、多（目）视觉、光场 3D 成像（电子复眼或阵列相机）实现。

单目视觉深度感知线索通常有：透视、焦距差异、多视觉成像、覆盖、阴影、运动视差等。在机器人视觉里还可以用镜像，以及其他 shapefromX 等方法实现。双目视觉深度感知视觉线索有：眼睛的收敛位置和双目视差。在机器视觉里利用两个相机从两个视点对同一个目标场景获取两个视点图像，再计算两个视点图像中同名点的视差获得目标场景的 3D 深度信息。典型的双目立体视觉计算过程包含下面四个步骤：图像畸变矫正、立体图像对校正、图像配准和三角法重投影视差图计算。

图4：立体视觉-双目成像原理



资料来源：《2022 年中国机器视觉产业发展白皮书》，民生证券研究院

多（目）视觉成像，也称多视点立体成像，用单个或多个相机从多个视点获取同一个目标场景的多幅图像，重构目标场景的三维信息。多视点立体成像主要用于下列几种场景：1) 使用多个相机从不同视点，获取同一个目标场景多幅图像，然后基于特征的立体重构等算法求取场景深度和空间结构信息；2) 从运动恢复形状的技术。使用同一相机在其内参数不变的条件下，从不同视点获取多幅图像，重构目标场景的三维信息。该技术常用于跟踪目标场景中大量的控制点，连续恢复场景的 3D 结构信息、相机的姿态和位置。

光场 3D 成像的原理与传统相机成像原理在结构原理上有所差异，传统相机成像是光线穿过镜头在后续的成像平面上直接成像，一般是 2D 图像。光场相机的优点是：单个相机可以进行 3D 成像，横向和深度方向的空间分辨率可以达到 20 $\mu$ m到mm量级，景深比普通相机大好几倍，比较适合 Eye-in-Hand 系统 3D

测量与引导，但目前精度适中的商业化光场相机价格昂贵。

**表2：机器视觉不同方案对比**

机器视觉方案	优点	缺点	
ToF	直接测量法	计算量少；通过调整脉冲周期可以提高测量距离	对光信号的稳定性要求较高；数据抖动性相对较大；需要较快 (~10ns) 高性能的全局曝光。
	间接测量法	对光信号的稳定性要求相对宽松；数据抖动性相对较少	计算量相对较大；需要通过多个频率计算扩大测量距离
双目	1. 被动双目由于其被动特性，硬件功耗较低； 2. 近距离精度为毫米级，2m 内误差在千分之五 (5mm)； 3. 硬件要求低，成本低； 4. 室内室外都可使用； 5. 分辨率可达到较高的 2k 分辨率。	1. 对环境光照非常敏感，光线变化导致图像偏差大，进而会导致匹配失败或精度低； 2. 不适用单调缺乏纹理的场景，双目视觉根据视觉特征进行图像匹配，没有特征会导致匹配失败； 3. 计算复杂度高，该方法是纯视觉的方法，对算法要求高，计算量较大； 4. 基线限制了测量范围，测量范围和基线(两个摄像头间距)成正比，导致无法小型化。	
结构光	1. 由于结构光主动投射编码光，因而非常适合在光照不足(甚至无光)、缺乏纹理的场景使用；2. 结构光投影图案一般经过精心设计，所以在一定范围内可以达到较高的测量精度；3. 技术成熟，深度图像可以做到相对较高的分辨率。	1. 室外环境基本不能使用。这是因为在室外容易受到强自然光影响，导致投射的编码光被淹没。增加投射光源的功率可以在一定程度上缓解该问题，但是效果并不能让人满意； 2. 测量距离较近。物体距离相机越远，物体上的投影图案越大，精度也越差(想象一下手电筒照射远处的情景)，相对应的测量精度也越差。所以基于结构光的深度相机测量精度随着距离的增大而大幅降低。因而，往往在近距离场景中应用较多； 3. 容易受到光滑平面反光的影响。	

资料来源：CSDN，民生证券研究院

机器视觉技术逐渐从 2D 向 3D 演进，3D 机器视觉将进一步提升工业制造领域的自动化渗透率。其中，识别距离远、抗干扰性强以及功耗较低的 TOF 方案有望在未来成为主流应用。

## 1.2.2 人形机器人主要视觉方案

**表3：主要人形机器人的视觉方案**

	TOF	立体视觉	结构光
特斯拉		✓	
优必选		✓	
小米	✓		
波士顿动力	✓		

资料来源：BFT 机器人，民生证券研究院

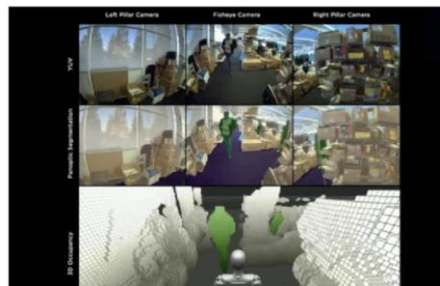
特斯拉 Optimus 机器人的 3D 传感模块以多目视觉为主，头部使用三颗 Autopilot 摄像头作为感知系统：Left/RightPillarCamera 左肩/右肩摄像头，和 FisheyeCamera 中央鱼眼摄像头，提供大于 180 度体前场景覆盖。在采集信息后，通过强大的神经网络处理和识别不同任务，依靠其胸腔内部搭载的 FSD 全套计算机完成。

图5：特斯拉 Optimus 视觉外观



资料来源：车右智能，民生证券研究院

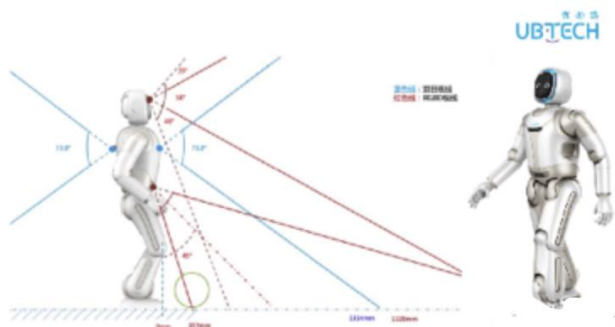
图6：特斯拉 Optimus 视觉画面



资料来源：特斯拉，民生证券研究院

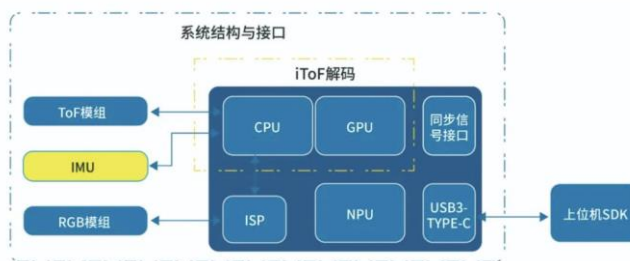
优必选 WALKERX 采用基于多目视觉传感器的三维立体视觉定位，采用 Coarse-to-fine 的多层规划算法，第一视角实景 AR 导航交互及 2.5D 立体避障技术，实现动态场景下全局最优路径自主导航。WALKER 应用视觉 SLAM 算法，视觉定位技术已经达到商用水平。

图7：优必选 WalkerX



资料来源：BFT 机器人，民生证券研究院

图8：小米 Mi-Sense 深度视觉模组结构参考



资料来源：欧菲光，民生证券研究院

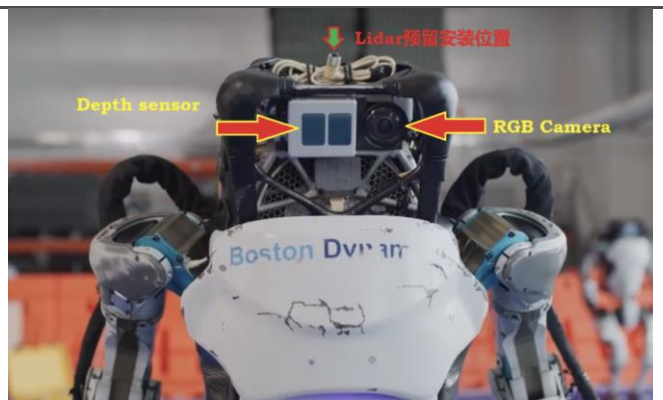
小米发布的 CyberOne 机器人所搭载的 Mi-Sense 深度视觉模组是由小米设计，欧菲光协同开发完成。而据欧菲光公开的资料，其机器视觉深度相机模块主要由 iToF 模组、RGB 模组、可选的 IMU 模块组成，产品在测量范围内精度高达 1%，应用场景十分广泛，可通过第三方实验室 IEC60825-1 认证，满足激光安全 Class1 标准。结合 AI 交互算法，Mi-Sense 深度视觉模组使其不仅拥有完整的三维空间感知能力，更能够实现人物身份识别、手势识别、表情识别，CyberOne 做到不仅看得到也能看得懂。

波士顿动力的 Atlas 头部有两个摄像头，一个是彩色相机，另一个则是 TOF 深度相机。Atlas 使用 TOF 深度相机以每秒 15 帧的速度生成环境的点云，点云是测距的大规模集合。Atlas 的感知软件使用一种名为多平面分割的算法从点云



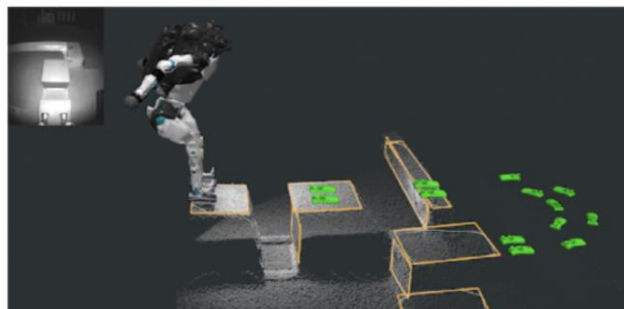
中提取平面。多平面分割算法的输入馈入到一个映射系统中，该系统为 Atlas 通过相机看到的各种不同对象构建模型，Atlas 再基于它构建的模型来规划路径。

图9：波士顿动力 Atlas 视觉外观



资料来源：车右智能，民生证券研究院

图10：波士顿动力 Atlas 视觉原理



资料来源：BFT 机器人，民生证券研究院

### 1.3 机器视觉市场空间

中国机器视觉行业相对于国际机器视觉市场发展较晚，全球市场以基恩士（日）、康耐视（美）、巴勒斯（德）等为代表的国际厂商为主。但在中国传统制造业自动化与数字化转型升级的驱动以及在中国机器视觉技术不断更新迭代的背景下，中国本土厂商占据的市场份额持续提升。以海康威视、大恒科技、天准科技为代表的中国本土机器视觉厂商已在核心零部件（工业相机、图像处理软件、光源、镜头、视觉控制系统等）技术与独立软件算法等方面进行大力投入，其整体的品牌竞争力有望持续提升。

GGII 数据显示，从全球市场来看，2021 年全球机器视觉市场规模约为 804 亿元，同比 2020 年增长 12.15%，预计至 2025 年该市场规模将超过 1200 亿元，2022 年至 2025 年复合增长率约为 12%；从中国市场来看，2021 年中国机器视觉市场规模 138.16 亿元(该数据未包含自动化集成设备规模)，同比增长 46.79%，预计至 2025 年我国机器视觉市场规模将达到 349 亿元。

**2021 年国内市场仍以外国厂商为主，基恩士、康耐视、巴勒斯三巨头在国内市场份额接近 50%**，但随着中国本土机器视觉企业数量的提升，同时本土厂商凭借为下游客户提供定制化服务与性价比优势，市场份额不断提升，以天准科技、奥普特为代表的本土厂商市场份额进入国内前十，中国机器视觉产业有望进一步提升国产化率。

## 2 机器视觉产业链上游介绍

### 2.1 相机分类及标准

#### 2.1.1 根据相机的工作方式分类

根据相机的工作方式的不同，可以将视觉传感器中的相机分成单目相机、双目相机和深度相机。深度相机能够获取场景中像素点的深度信息，通过使用不同的技术，如结构光、飞行时间等，可以实时捕捉物体的三维形状和距离信息，又分成结构光深度相机以及光飞行时间法深度相机。

单目主要是可见光摄像头，双目由一个可见光摄像头加一个红外光摄像头组成。单目相机结构简单，成本低，本质上是拍照时的场景，在相机的成像平面上留下一个投影，以二维的形式反映三维的世界。

双目相机通过两个相机之间的距离来估计每个像素的空间位置，基线距离越大，能够测量到的就越远。双目与多目的缺点是配置与标定均较为复杂，其深度量程和精度受双目的基线与分辨率的限制，而且视觉计算非常消耗计算资源，需要使用 GPU 和 FPGA 设备加速后，才能实时输出整张图像的距离信息。

图11：单目相机



资料来源：金视康科技，民生证券研究院

图12：双目相机



资料来源：金视康科技，民生证券研究院

**结构光深度相机**是通过近红外激光器，将具有一定结构特征的光线投射到被拍摄物体上，再由专门的红外摄像头进行采集。这种具备一定结构的光线，会因被摄物体的不同深度区域，而采集不同的图像相位信息，然后通过运算单元将这种结构的变化换算成深度信息，以此来获得三维结构。简单来说就是，通过光学手段获取被拍摄物体的三维结构，再将获取到的信息进行更深入的应用。

**光飞行时间法 (TOF) 深度相机**是通过给目标连续发射激光脉冲，然后用传感器接收从反射光线，通过探测光脉冲的飞行往返时间来得到确切的目标物距离。TOF 法根据调制方法的不同，一般可以分为两种：脉冲调制 (PulsedModulation) 和连续波调制 (ContinuousWaveModulation)。脉冲

调制需要非常高精度时钟进行测量，且需要发出高频高强度激光，目前大多采用检测相位偏移办法来实现 TOF 功能。

图13：结构光相机



资料来源：奥比中光，民生证券研究院

图14：ToF 相机



资料来源：奥比中光，民生证券研究院

## 2.1.2 各类型相机所获取的信息类型

单目相机不能通过单张图片得到深度信息（距离），存在尺寸不确定的现象，只能获取二维图像信息。

双目相机利用左右目的视差计算像素的距离，从而实现自身的定位。立体视觉既可以在运动时估计深度，亦可在静止时估计，消除了单目视觉的无法得到深度信息的麻烦。

深度相机比传统相机能够提供更丰富的信息，除了获取二维图像信息外，还能直接获取场景中各点的深度信息，因此可以进行更精确的三维分析和交互。

## 2.1.3 各类型相机的应用场景

单目相机常见于手机、平板电脑、笔记本电脑等便携式设备中，可适用于无人机定位与导航、机器人视觉导航、物体尺寸测量及运动捕捉等场景。

双目相机因为可以获取更为深度的信息，因此可用于深度估计、立体视觉、自动驾驶、手势识别等。

深度相机能够获取场景中像素点的深度信息，通过使用不同的技术，如结构光，飞行时间等，可以实时捕捉物体的三维形状和距离信息。结构光深度相机可用于物体信息分割与识别、3D 人脸识别、体感手势识别、三维场景重建等。TOF 深度相机可用于汽车自动驾驶、工业 HMI（人机接口）人脸识别系统、工业定位、工业引导和体积预估、机器人导航、识别外界环境、规划路径、实现避障等。

## 2.2 机器视觉上游零部件介绍

### 2.2.1 工业相机部件组成和介绍

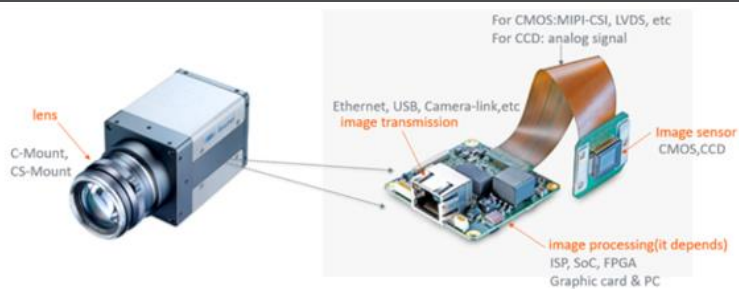
工业相机硬件通常由镜头、图像传感器、图像处理电路及图像传输电路组成。镜头一般是由透镜+镜筒+间隔环和镜座组成，透镜一般有塑胶透镜和玻璃透镜。工业相机常用的镜头构造有：2G2P、4G2P、5G、6G 等，透镜越多，成本越高，且玻璃透镜比塑胶贵，非球面比球面贵。

图像传感器按照半导体感光元器件类型的差异主要分为两大类：CCD(charge coupled device) 和 CMOS(complementary metal oxide semiconductor)。CCD 和 CMOS 都基于光电效应将光信号转换为电信号，由于 CMOS 各个像素点电荷-电压转换器独立工作，一致性相对较差，因此成像质量低于 CCD。

图像信号处理电路接收 CIS 的传送过来的 RAW 数据，经过系列处理转换为最终的 RGB 数据。在工业相机领域，应用比较多的图像处理平台为这两种：FPGA 和 Camera+图像采集卡+计算机。FPGA 为现场编程、并行架构 IC，灵活性高，可以运行客户定制算法。在典型应用场景的图像处理算法比较成熟，如：特征识别、颜色识别、缺陷检测等。

图像信号传输接口分为模拟接口和数字接口，由于抗干扰能力强、易于加密、便于后续处理等等因素，数字化是未来发展的趋势。工业相机使用较多的接口为：Camera-Link、CoaXPress、GBE、USB3.0。

图15：工业相机零部件组成示意图



资料来源：来一点橙知公众号，民生证券研究院

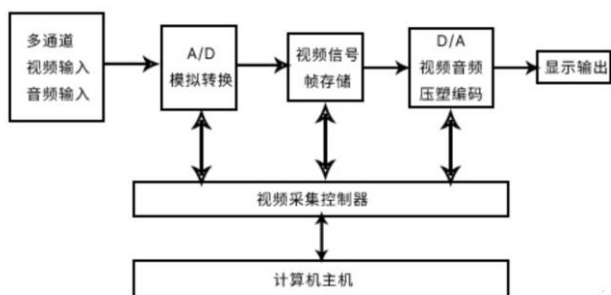
### 2.2.2 图像采集卡介绍

机器视觉系统分为图像采集与图像处理两大板块，图像采集部分主要由 LED 光源、工业镜头以及工业相机互相配合组合而成，图像处理部分则是由图像处理软件来实现，在原理结构上，图像采集卡承担着连接着工业相机与图像处理软件的功能，它要准确接受前端摄像机的各种规格的视频数据，接收外来的触发脉冲，并启动摄像机的曝光和扫描，在系统中发挥重要的作用。

图像采集卡又称为图像卡，它将摄像机的图像视频信号，以帧为单位，送到

计算机的内存和 VGA 帧存，供计算机处理、存储、显示和传输等使用；在机器视觉系统中，图像卡采集到的图像，供处理器作出工件是否合格、运动物体的运动偏差量、缺陷所在的位置等等的处理。

图16：图像采集卡原理



资料来源：芯算一体，民生证券研究院

图17：图像采集卡



资料来源：埃科光电官网，民生证券研究院

### 2.2.3 图像传感器市场规模及其头部厂商

随着技术进步和应用领域的不断扩大，全球图像传感器市场有望实现大幅增长。随着汽车、消费电子、医疗保健和安防等行业对高质量成像解决方案的需求不断增加，图像传感器市场有望在未来几年达到新的里程碑。根据 Mordor Intelligence Research&Advisory 预测数据，全球 CCD 图像传感器市场预计 2023 至 2028 年将实现 3.1% 的复合年增长；全球 CMOS 图像传感器市场 2023 至 2027 年的复合年增长率预计将达到 6.22%。全球图像传感器头部品牌商有图像传感器全球市场头部制造商有 Sony（索尼）、ON（安美森）、Panasonic（松下）、Samsung（三星）、OmniVision（美商半导体，中文名豪威科技）、Canon（佳能）、STMicroelectronics N.V.（意法半导体）、Toshiba（东芝）、SKhynix（海力士）。

图18：CCD 图像传感器市场规模和头部厂商



资料来源：Mordor Intelligence Research&Advisory，民生证券研究院

图19：CMOS 图像传感器市场规模和头部厂商



资料来源：Mordor Intelligence Research&Advisory，民生证券研究院

## 2.2.4 图像处理芯片市场规模及其头部厂商

FPGA 是一种以数字电路为主的集成芯片，由 Xilinx 创始人 RossFreeman 发明，属于可编程逻辑器件（Programmable Logic Device, PLD）的一种。FPGA 通常应用于数字信号处理、视频处理、图像处理、5G 通信领域、医疗领域、工业控制、云服务、加速计算、人工智能、数据中心、自动驾驶、芯片验证等场景中。

根据 Mordor Intelligence Research&Advisory 预测数据。2023 年 FPGA 的市场规模为 87.6194 亿美元，2028 年预计将达到 131 亿美元，2023-2028 年年复合增长率为 8.32%。头部制造商有 Altera（阿特拉）、Xilinx（赛灵思）、Lattice（莱迪思）、Intel（英特尔）、QuickLogic（快辑）。

图20：图像处理芯片（FPGA）市场规模和头部厂商



资料来源：Mordor Intelligence Research&Advisory，民生证券研究院

## 2.3 机器视觉部件单价一探

消费级 3D 视觉方案对于精度的要求更低，市场竞争激烈，对成本的控制更为严格。以奥比中光披露的采购详情作为参考：奥比中光采购主要成本集中在电子器件，占采购总金额的 23.38%，单价最贵的元件为通用感光芯片。

表4：奥比中光 3D 传感器上游零部件单价及成本占比

名称	单价 (元/件)	占采购总金额比例
电子器件	0.33	23.38%
结构件	3.48	9.52%
通用感光芯片	16.71	8.15%
自研芯片	14.42	5.25%
镜头	3.37	2.54%
激光发射器	14.39	1.68%
滤光片	2.16	0.64%
衍射光学元件	2.55	0.52%

资料来源：奥比中光招股书，民生证券研究院

**表5：奥比中光系列产品单价(2021)**

名称	简介	销售收入 (万元)	销量 (万台)	单价 (元/台)
Astra	基于边发射激光投影，搭载了公司自研深度引擎芯片的结构光 3D 视觉传感器；通用性较强，测量范围大、应用场景多，适用于各类开发者进行原型机开发；适用于 AIoT 领域的空间扫描、服务机器人等应用场景。	8,423.18	5.95	528.25
Astra E	基于 VCSEL 激光投影，搭载了公司自研深度引擎芯片的结构光 3D 视觉传感器；最初为生物识别、近距离机器人等领域设计，产品体积较小、嵌入式整合难度低、有一定的定制灵活性；适用于生物识别领域的线下支付场景、智能门锁等应用场景。	21,495.60	66.80	321.81
Astra G	基于 VCSEL 激光投影，搭载公司自研深度引擎芯片的双目 3D 视觉传感器；最初为生物识别、机器人等行业的户外、半户外场景设计；体积较小，嵌入式整合难度低，有一定的定制灵活性；是对 Astra E 系列的补充，精度略微降低，但是户外能力强化；适用于 AIoT 领域的服务机器人、智慧农牧、智能交通等应用场景。	4,412.74	7.46	591.13
Astra X	基于 iToF 技术的标准品，支持公司自研 ioF 感光芯片，使用公司自研 iToF 算法；高度可定制的 ioF 3D 视觉传感器，主要用于手机、平板、电视等对深度定制有需求的客户；适用于消费电子领域的智能手机、智能电视等应用场景。	1,006.30	8.78	114.57
Astra P	基于 VCSBL 激光投影，搭载公司自研深度引擎芯片的结构光 3D 视觉传感器；高度可定制参考设计，可以根据客户对精度、环境适应性、量程等需求进行深度定制；适合应用于手机、平板电脑、门锁等大规模消费级产品；在手机前置结构光领域达到过百万级别的量立；适用于消费电子领域的智能手机等应用场景。	-	-	-
Astra T	基于 iToF 技术的标准品，支持第三方 iToF 感光芯片、公司自研 ioF 感光芯片，使用公司自研 iToF 算法；公司首款 iToF 领域的标准品本类产品目前使用模块化设计，板载深度算力强，深度图像质量高，测量范围较大；AIOT 领域的服务机器人等应用场景。	7.79	0.01	1,276.34
合计		35,345.60	99.00	357.04

资料来源：奥比中光招股书，民生证券研究院

**表6：奥比中光部分零售产品**

类别	产品图	名称	价格 (元)
单目结构光		奥比中光 (ORBEC) Deeyea	1,000
双目结构光		奥比中光 (ORBEC) Gemini 2	1,999

ToF 模组



奥比中光 (ORBEC) Femto iToF 3D 相机

2,499

资料来源：京东奥比中光旗舰店，民生证券研究院

工业级机器视觉由于各厂商内部情况和应用场景不同，需求各有不同，整体市场定制化程度更高，对技术、精度、稳定性等的要求也更高，很多厂商也采购国外品牌，因此整体成本较高。如主营工业相机的埃科光电，主要通过国内品牌代理商或贸易商采购关键原材料，图像传感器、处理器等主要使用国外知名品牌如 Sony (索尼)、AMS (艾迈斯)、ON (安森美)、Altera (阿特拉)、Xilinx (赛灵思)，采购的图像传感器单价近 3000 元；根据招股书，埃科光电线扫相机的平均单价为 6626.54 元，面扫相机的平均单价为 36695.15 元，图像采集卡的平均单价为 2965.8 元。

**表7：埃科光电工业相机上游零部件单价及成本占比 (2022 年)**

名称	单价 (元/个)	占采购总金额比例
图像传感器	2977.96	44.82%
处理器	550.83	24.68%

资料来源：埃科光电招股书，民生证券研究院

**表8：埃科光电产品单价(2022 年)**

产品名称	销售收入 (万元)	销量 (台或张)	单价 (元/台或元/张)
工业线扫描相机	12,347.23	18,633	6,626.54
工业面扫描相机	6,605.13	1,800	36,695.15
图像采集卡	5,636.21	19,004	2,965.80

资料来源：埃科光电招股书，民生证券研究院



### 3 惯性导航方案

#### 3.1 IMU (惯性测量单元) 介绍

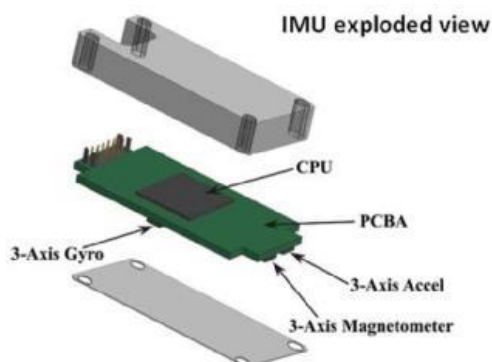
IMU(Inertial Measurement Unit)即惯性测量单元，是测量物体三轴姿态角（或角速率）及加速度的装置。一个 IMU 通常包含三个轴向的陀螺和三个轴向的加速度计，以测量物体在三维空间中的角速率和加速度。

图21: IMU 外观图



资料来源：华强电子，民生证券研究院

图22: MEMS IMU 拆解图

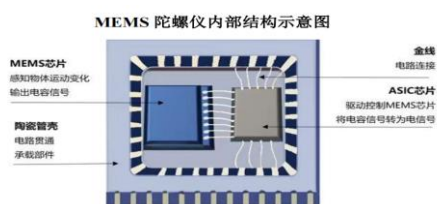


资料来源：萝卜投研，民生证券研究院

##### 3.1.1 陀螺仪分类及工作原理

陀螺仪按照技术路径可以分为：1) 光纤陀螺仪 (FOG); 2) 激光陀螺仪 (RLG); 3) MEMS (微电机系统) 陀螺仪; 4) 半球谐振陀螺仪; 5) 机械陀螺仪。MEMS 陀螺仪采用半导体加工技术在硅晶圆上制造出的 MEMS 芯片，在 ASIC 芯片的驱动控制下感应外部待测信号并将其转化为电容、电阻、电荷等信号变化，ASIC 芯片再将上述信号变化转化成电学信号，最终通过封装将芯片保护起来并将信号输出，从而实现外部信息获取与交互的功能。

图23: MEMS 陀螺仪内部结构



资料来源：芯动联科招股书，民生证券研究院

图24: MEMS 陀螺仪外观

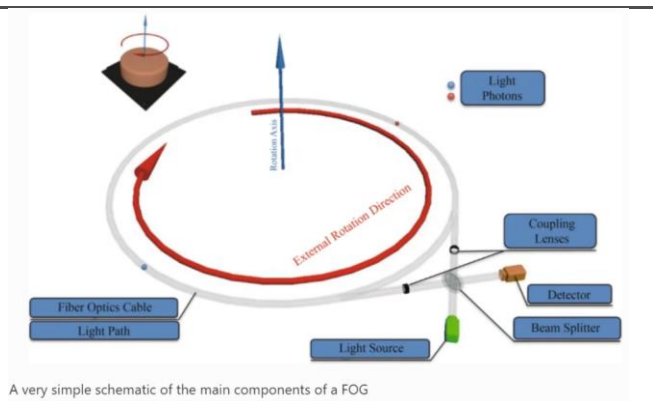


资料来源：芯动联科官网，民生证券研究院

**光纤陀螺由光源、光探测器和一组耦合透镜组成。**光源发出的光通过分束器。然后，光波流入两个相反的路径，通过分束器重新连接到光探测器。根据探测器的要求，两组光束的干涉图样保持不变，直到陀螺仪围绕其敏感轴进行外部旋转。最后，干涉图样的变化幅度与角速度成正比。

**激光陀螺仪利用光程差来测量旋转角速度 (Sagnac 效应)**，基本原器件为环形激光器。激光陀螺仪与光纤陀螺仪采用的技术原理相类似，但用密封环腔来替代光纤。在闭合光路中，由同一光源发出的沿顺时针方向和反时针方向传输的两束光和光干涉，利用检测相位差或干涉条纹的变化，就可以测出闭合光路旋转角速度。

图25: 光纤陀螺仪工作原理



A very simple schematic of the main components of a FOG

资料来源: BFT 机器人, 民生证券研究院

图26: 光纤陀螺仪拆解



资料来源: 哔哩哔哩, 民生证券研究院

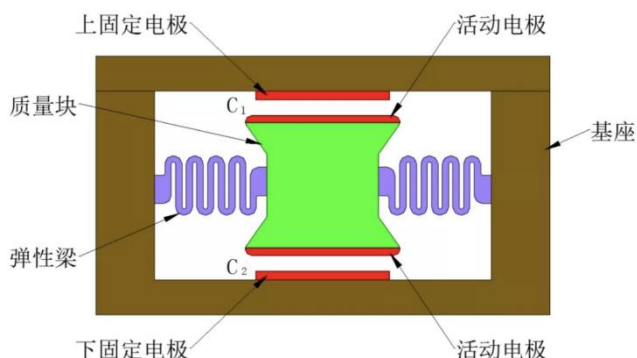
### 3.1.2 加速度计分类及工作原理

MEMS 加速度计是一种能够测量物体线加速度的器件，通常由质量块、阻尼器、弹性元件、敏感元件和适调电路等部分组成。加速度计的理论基础是牛顿第二定律，传感器在加速过程中，可通过对质量块所受惯性力的测量计算出加速度值。如果初速度已知，就可以通过加速度对时间积分得到线速度，再次通过线速度对时间积分可计算出直线位移。

MEMS 加速度计可以分为电容式、压电式、热感式、谐振式等。

电容式加速度被广泛应用于 MEMS 技术制造。其结构原理如下图所示，一个质量块固定在弹性梁的中间，质量块的上端面是一个活动电极，它与上固定电极组成一个电容器 C1；质量块的下端面也是一个活动电极，它与下固定电极组成另一个电容器 C2。当被测物的振动导致与其固连的传感器基座振动时，质量块将由于惯性而保持静止，因此上、下固定电极与质量块之间将会产生相对位移。这使得电容 C1、C2 的值一个变大、另一个变小，从而形成一个与加速度大小成正比的差动输出信号。电容式加速度计有跷跷板摆式、梳齿式和三明治摆式三种常见结构。

图27：电容式加速度计内部结构



资料来源：zdinnova，民生证券研究院

图28：芯动联科 MEMS 加速度计



资料来源：芯动联科官网，民生证券研究院

### 3.1.3 IMU 按照精度的分类

任何给定 IMU 在提供精确导航解决方案方面的性能是由其测量中包含的系统误差和随机误差的大小顺序决定的。因此，IMU 根据其性能和精度分为不同等级。然而，可以理解的是，任何给定 IMU 的性能、其基础技术和成本之间存在高度相关性。其中，IMU 分为：战略级、导航级、战术级和消费级

图29：IMU 等级分类及价格

陀螺仪零偏稳定性	IMU等级及价格	
1°/s	消费级 1元-几十元	
100°/h	工业级&低端战术级 (几百元-几千元)	
10°/h	战术级 (几千元-几万元)	Emcore EG200光纤陀螺仪33定价约12,554美元，零偏稳定性1°/h
1°/h		芯动联科MEMS陀螺仪20L定价约2,500元，零偏稳定性0.3°/h
0.1°/h	导航级 (几万元-十几万)	芯动联科MEMS陀螺仪33定价约9,000元，零偏稳定性0.05°/h
0.01°/h		Emcore EG1300光纤陀螺仪33定价约28,129美元，零偏稳定性0.01°/h
0.001°/h	战略级 (几十万)	
0.0001°/h		

资料来源：fogphotonics，芯动联科招股书，芯动联科问询函回复，民生证券研究院

## 4 惯性导航在自动驾驶和人形机器人领域的应用

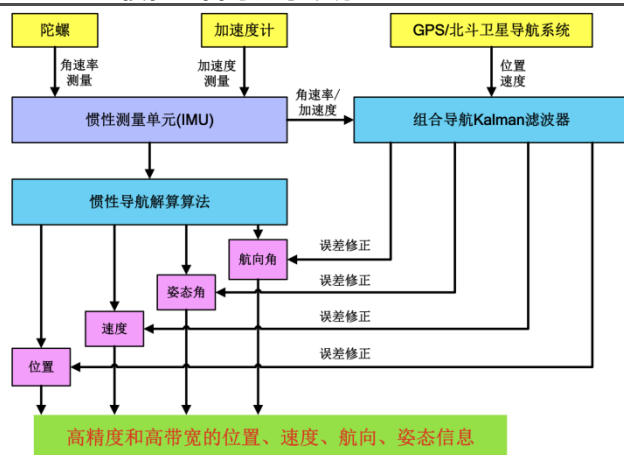
### 4.1 高精度惯导为 L2.5+ 自动驾驶刚需

惯性导航是惯性技术重要应用之一，惯性导航系统（Inertial Navigation System - INS）是以陀螺仪和加速度计为敏感器件并融合卫星导航、卫星导航、天文导航、无线电导航等其他导航技术而形成的导航参数解算系统。

目前 ADAS 系统一般运用速度计、陀螺仪、压力传感器和磁力仪等惯性传感器。加速度计用来测量运动物体的加速度大小和方向，获取位移信息；陀螺仪形成导航坐标系，使加速度计测量值投影到该坐标系中，可输出航向和姿态角；磁力仪用来测量测量磁场强度和方向，定位方向，通过地磁向量得到误差表征量，可反馈到陀螺仪的姿态解算中，用以校准陀螺仪的漂移。

GNSS+IMU 方案是最常用的惯性导航系统设计方案，二者形成互补。GNSS 在卫星信号较弱的场景下会导致定位信息延迟而造成不可预知的失控场景；惯性导航系统数据更新率高，导航信息延迟低，而且系统稳定不易受到外界干扰，可以不依托外在信息，不惧极端环境和弱信号影响，能够解决持续性问题，但长期时间运作会导致系统累计误差增加，因此需要 GNSS 解决精准性问题，对位置信息进行校准。其算法示意图如下：

图30: IMU+GNSS 惯性组合导航系统原理



资料来源：星网宇达，民生证券研究院

高精度惯性传感是 L2.5 以上自动驾驶刚需，多传感器融合方案正在演进中。目前，依靠单一定位技术无法满足自动驾驶汽车所需要的高精度。从现有乘用车和商用车主机厂使用的方案看，基本使用多传感器融合定位技术，除了采用组合导航和高精度地图，还会选择视觉 SLAM 激光雷达等技术。

**表9：乘用车定位单元方案**

品牌	车型	上市时间	配置高精定位的车款	定位方案	传感器配置
小鹏	P7	2020/4	智尊版和鹏翼版	高精度地图(高速)+GNSS+RTK+IMU	12个超声波雷达、5个毫米波雷达、13个驾驶辅助摄像头和1个车内摄像头
	P5	2021/9	460E/550E 搭载 XPILOT 3.0 550P/600P 搭载 XPILOT 3.5	高精度地图(高速&城市)+GNSS+RTK+IMU	13个摄像头、5个毫米波雷达、12个超声波雷达、2个激光雷达
蔚来	EC6	2020/7	签名版标配, 其它车款选装(精选包 1.5 万元, 全配包 3.9 万元)	GPS+高精度地图	三目前向摄像头、4个环视摄像头、5个毫米波雷达、12个超声波传感器
	ES6	2020/5			三目前向摄像头、4个环视摄像头、5个毫米波雷达、12个超声波传感器
	ET7	2021/1	消费者选装, 每月支付 680 元按月订阅 NAD	高精度地图+高精度定位终端+V2X	2个前视、4个侧视、1个后视、4个环视、1个激光雷达、6个毫米波雷达、12个超声波雷达
华人运通	高合 HiPhi X	2020/9	标配	RTK+GNSS+IMU+高精度地图+V2X	8个摄像头、24个超声波雷达、5个毫米波雷达
理想	2021 款理想 ONE	2021/5	2021 款标配	RTK+GNSS+IMU+高精度地图	1个单目摄像头、4个环视摄像头、5个毫米波雷达、12个超声波雷达
一汽红旗	E-HS9	2020/12	标配	高精度地图+GNSS+RTK+IMU+5G-V2X	26个车身传感器(包括3个摄像头+5个毫米波雷达)
广汽	埃安 V	2020/6	80Max 版	高精度地图+GNSS+RTK+IMU	12个超声波传感器+4个高清全景摄像头
	埃安 LX	2020/11	70 智领版、80 智尊版、80DMax 版配置, 80D 智臻版选装		12个超声波雷达、5个毫米波雷达、4个全景摄像头、1个前视摄像头
	埃安 V Plus	2021/9	80 智享科技版选配 80 领航智驾版, 90 超长续航版标配		摄像头、毫米波雷达、超声波雷达
	埃安 LX Plus	2022/1	80D 旗舰版标配 ADiGO 3.0、80DMax 版标配 ADiGO 4.0	高精度地图+GNSS+RTK+IMU+5G-V2X	6个毫米波雷达、12个超声波雷达、8个自动驾驶高清摄像头、4个环视摄像头、3个第二代智能可变焦激光雷达

资料来源：佐思汽研，民生证券研究院

**表10：商用车定位单元方案**

品牌	场景	定位单元
Waymo	Robotaxi	UDAR+HD Map+GNSS+IMU
Apollo	Robota	UDAR+ 视觉+ GNSS+IMU+HD Map
滴滴	Robotaxi	UDAR+ 视觉+GNSS+IMU
美团	无人配送	GNSS+IMU+ UDAR+ HD Map
中联重机	无人农机	视觉+GNSS+ 角度传感+ IMU
踏歌智行	无人矿卡	SLAM+GNSS+IMU
希迪智驾	无人环卫	GNSS+IMU

资料来源：头豹研究院，民生证券研究院

## 4.2 人形机器人借助 IMU 实现定位、平衡及姿态检测

IMU 是人形机器人保持平衡及运动控制的关键传感器。惯性传感器采集的角速度与加速度等惯性信息可以用于推算人形机器人的实时位置与运动轨迹，同时可以与机器人搭载的多传感器融合，在数据类型和数据频率间实现互补，IMU 与电机编码器、相机等融合可以达到精准预测速度和轨迹、维持平衡、避障等目的。

**表11：人形机器人 IMU 方案**

品牌	采用 IMU 方案
UCLA ARTEMIS	最初方案选择 Parker LORD Microstrain 公司的 MEMS IMU 3DM-GX5；后改用更高性能的 MicroStrain MEMS 3DM-CV7 战术级 IMU，其性能已接近光纤陀螺仪 IMU，提供航向数据，同时以来摄像头或 GNSS 进行航向补偿。
特斯拉 Optimus	在机器人模型方面，特斯拉依靠已经用于特斯拉自动驾驶汽车的多模态神经网络，用于接收和处理来自相机、GPS、IMU 的数据，以预测是否有车辆、行人或其他物体等障碍物。
波士顿动力 Atlas	Atlas 采用 IMU 和力传感器来控制其身体运动并保持平衡，但仍然需要来自 ToF 相机和激光雷达等传感器的补偿来感知障碍物。
小米 CyberOne	Mi-Sense 深度视觉模组由小米设计，欧菲光协同开发完成，主要由 iToF 模组、RGB 模组、可选的 IMU 模块组成

资料来源：UCLA Zhu “Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot”，波士顿动力，雪球，Decoder，民生证券研究院

## 5 IMU 技术难点重在解决误差和提高精度

### 5.1 惯性传感器中存在系统误差和随机误差

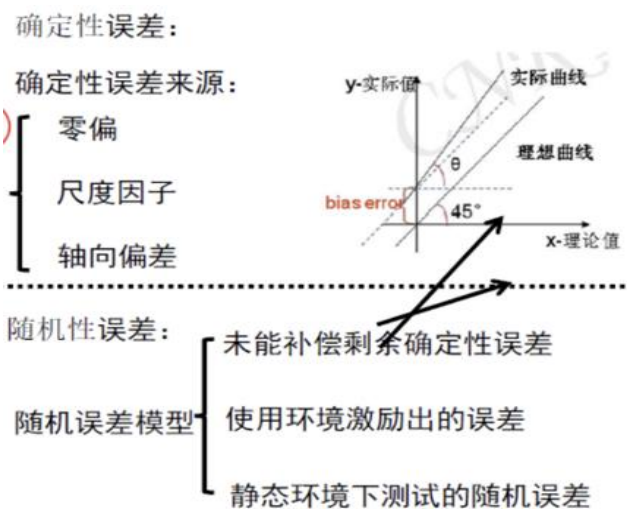
#### 5.1.1 系统误差

所谓系统误差是指非随机误差，系统性误差本质就是能找到规律的误差，所以可以实时补偿掉，可以通过传感器的校准消除。陀螺仪和加速度计的系统误差一般包含以下几种：开机后恒定的零偏误差（bias），比例因子误差（scale factor），不重合及非正交误差（misalignment and non-orthogonality），非线性误差（non-linearity），温度误差（thermal noise）。其中陀螺仪还包含加速度的变化引起的误差（g-dependent noise）。惯性传感器中的偏差是测量值与传感器实际输入值之间的恒定偏移。而比例因子是一种误差，表示惯性传感器的输入量与传感器报告的输出量之间的不匹配。通常情况下，惯性传感器报告的输出值应等同于传感器的输入值。因此，预期的输入输出比应等于 1。然而，比例因子将表现为惯性传感器的输入输出关系偏离等于 1。系统误差的另一种形式是比例因子非线性误差。通常情况下，传感器的输入输出关系是线性关系。然而，由于环境影响和某些传感器的设计，惯性传感器的输入输出关系可能不是线性关系。

#### 5.1.2 随机误差

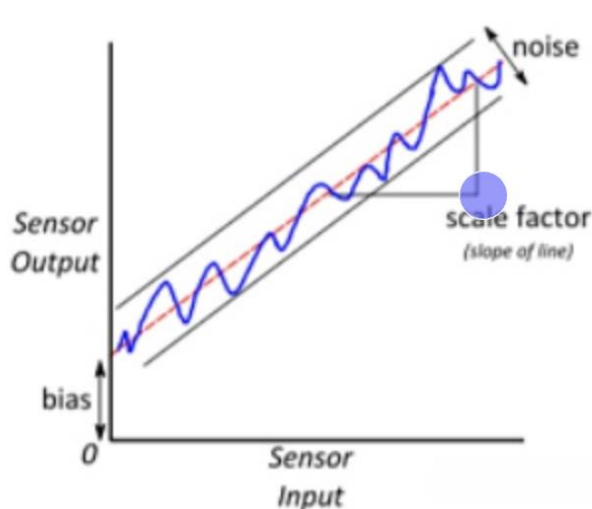
惯性传感器中，随机误差一般指噪声，无法找到合适的关系函数去描述噪声，所以很难处理，主要包含随机行走误差和零偏不稳定性误差，其中随机行走误差可以理解为传感器的高斯白噪声，零偏不稳定性误差表现为传感器的零偏会随时间逐渐变化。

图31：确定性与随机性误差的来源



资料来源：知乎，民生证券研究院

图32：三种典型的误差源



资料来源：知乎，民生证券研究院

## 5.2 光纤陀螺仪技术难点

导致光纤陀螺仪误差增大、精度下降的主要难点为：1) 灵敏度消失：当旋转速率接近零时，灵敏度会消失。这是由于检测器中的光密度正比于萨格纳克 Sagnac 相移的余弦量所引起。2) 噪声：光纤陀螺仪的噪声是由于瑞利背向散射引起的。为了达到低噪声，应采用小相干长度的光源。3) 光纤双折射引起的漂移和偏振状态改变引起的比例因子不稳定：如果两束相反传播的光波在不同的光路上，就会产生漂移。造成光路长度差的原因是单模光纤有两正交偏振态，此两种偏振态光波一般以不同速度传播。由于环境影响，使两正交偏振态随机变化。

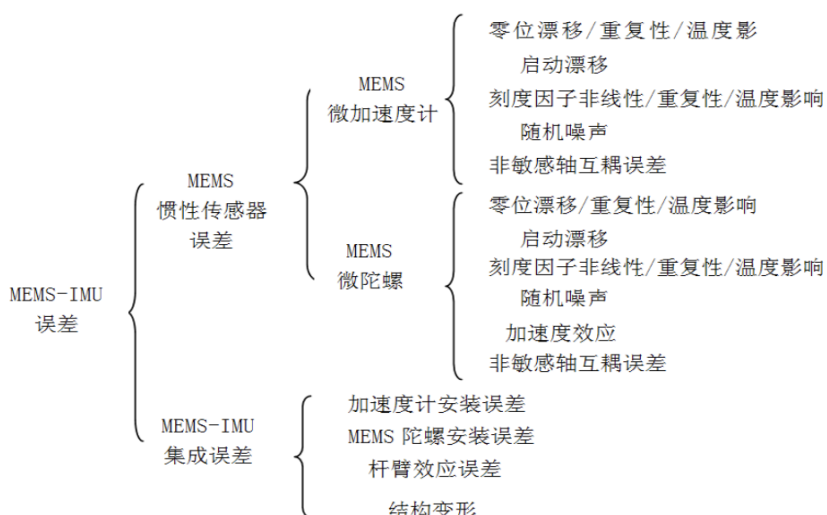
## 5.3 MEMS 陀螺仪与 IMU 技术难点

### 5.3.1 MEMS 陀螺仪主要误差来源

MEMS IMU 的误差一是来源于惯性传感器自身的误差，二是 IMU 在集成过程中产生的误差，两种误差的具体分类及各误差因素解释如下。

MEMS IMU 的总误差中，安装误差和温度是 MEMS 微惯性组合的主要误差源，这两种因素所引起的误差通常占系统总误差的 90%以上，同时由于硅基 MEMS 惯性器件的加工工艺特殊性，MEMS 体硅制造工艺也会导致输出误差，下面将从 MEMS 体硅制造工艺产生的误差、温度误差和安装误差三个方面进行介绍。

图33: MEMS-IMU 误差分类



资料来源：代刚《MEMS-IMU 误差分析补偿与实验研究》，民生证券研究院



**表12: MEMS IMU 误差类型**

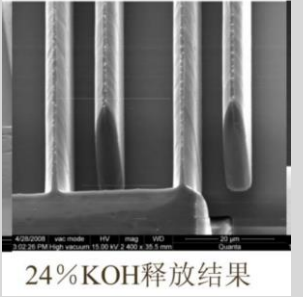
误差类型	误差产生原因
零偏	MEMS 惯性传感器零偏参数误差主要包含零偏，零偏稳定性与重复性导致的误差。其中零偏和零偏重复性导致的误差可以在初始对准时进行消除。零偏稳定性反映了传感器在一定输入的条件下，其输出随时间的漂移程度，它与传感器自身的设计与结构，外界条件的影响有关，主要条件为温度。
刻度因数	由于 MEMS 加速度计和 MEMS 陀螺通过刻度因数进行信号转换，因此刻度因数的误差将直接带来测量的系统偏差。刻度因数的误差分为非线性误差和温度漂移两类。
非敏感轴互耦误差	敏感轴互耦误差指的是传感器非敏感轴上有输入时产生的误差输出。产生非敏感轴互耦误差的原因多是由于传感器本身结构的存在一定的非正交性或者说有一定的非垂直度。
加速度灵敏度	微陀螺的敏感加速度的输出，这是一个误差项。由于微陀螺多是基于机械振动的陀螺，因此可能会受到加速度的影响。特别是在某些具有较大加速度的应用条件时。
启动漂移	MEMS 惯性传感器在启动后输出随时间发生的漂移，表征为输出不稳定，漂移时间从半小时到数个小时不等，在这个时间段内由于漂移，使得传感器的零偏稳定性参数变差，产生额外的误差，需要较长时间的预热准备过程。
随机噪声	MEMS 惯性传感器的随机噪声主要是结构的随机噪声和电路的随机噪声两种，其中结构的随机噪声主要是机械热噪声(布朗噪声)，电路的随机噪声则包括热噪声，g-r 噪声，1/f 噪声，散粒噪声等，其中机械热噪声和电路的热噪声对微传感器性能影响较大，是主要的研究对象 机械热噪声的根源是周围气体或液体分子对机械颗粒的随机碰撞即布朗力作用。这种作用对宏观结构的影响是可以忽略的，但是对于微米甚至纳米量级的 MEMS 系统则不可忽略，该噪声直接影响了 MEMS 器件的灵敏度和分辨率，并且增加了测量时的随机误差。 电路热噪声的来源是在绝对温度为零度以上的导体中的载流子都在做无规则的热运动，这种无规则的热运动叠加在载流子的有规则运动之上，就引起了电流偏离平均值的起伏，而导致电压的起伏

资料来源：代刚《MEMS-IMU 误差分析补偿与实验研究》，民生证券研究院

### 5.3.2 MEMS 体硅工艺的难点和误差

目前 MEMS 体硅工艺中主要的腐蚀与刻蚀技术是基于标准 Bosch 工艺的干法刻蚀(DRIE)与基于浓硼硅腐蚀自停止的结构释放与硅片减薄工艺。下表整理了 MEMS 工艺过程中的微结构尺寸误差，微结构尺寸误差会导致梁宽存在不一致性，并导致梳齿电容误差，进而导致 IMU 输出误差。

表13: 体硅 MEMS 制造中产生的误差

误差类型	误差产生原因	示意图
刻蚀宽度误差	使用标准 Bosch 工艺存在的问题是在刻蚀相同深度, 不同宽度的槽时, 宽度越大的槽, 进入槽内的离子通量也就越大, 这样使得刻蚀的速度越快, 造成在设计版图上越宽的槽刻 出来后的宽度就比版图上的越宽, 造成梁宽度的减小, 这就是 ARDE(Aспект Ratio Dependent Etch)	
来自腐蚀的误差	当使用碱性溶液进行浓硼硅的自停止腐蚀时, 由于不同浓度的 KOH 对硅和浓硼硅的腐蚀速率不同;高浓度的 KOH, 虽然可以较快地腐蚀硅层, 释放结构, 但是也会使得浓硼硅结构层也受到较大的腐蚀, 使梳齿变尖。通过采 用不同浓度 KOH 混合分次使用, 可以实现即保证腐蚀速率, 又减小浓硼硅结构层的腐蚀。但是不管是怎样的方法, 都会对微结构产生额外的腐蚀, 造成尺寸的损失与尺寸差异的随机性增加。	
掩膜失准误差	由于不同刻蚀步骤之间掩膜板可能存在一 定的失准误差, 使得多次刻蚀出来的微结构的相对位置发生变化, 当主要的结构部分是次刻蚀成形时, 该项误差影响较小。	

资料来源: 代刚《MEMS-IMU 误差分析补偿与实验研究》, 民生证券研究院

### 5.3.3 温度变化引发的误差

温度会影响材料的属性, 材料属性影响结构参数和电参数, 使微陀螺仪和微加速度计输出发生漂移。温度对材料属性的影响主要体现在几个方面:1) 温度会影响硅材料的杨氏模量, 而由于结构刚度正比于材料的杨氏模量, 因此温度会直接影响微结构的刚度; 2) 温度变化会影响微结构的尺寸, 这主要是由于硅材料的热膨胀。结构尺寸的变化将会影响检测电容面积和间距, 造成检测电容的变化, 从而造成检测电容差的变化; 3) 温度会影响介质的介电常数, 介电常数主要影响极板之间的电容, 使得电容差发生变化, 产生漂移; 4) 温度还会影响驱动与检测电路的电参数, 由于驱动与检测电路也是硅基的芯片, 同样会受到温度的影响。

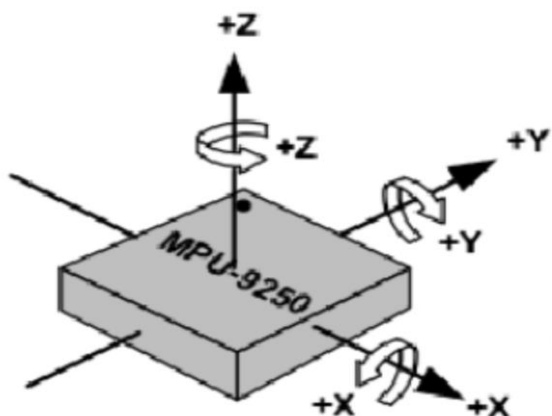
### 5.3.4 MEMS 集成误差

MEMS-IMU 的集成误差主要包括的是传感器安装误差, 杆臂效应误差两种, 传感器安装误差主要是由 MEMS-IMU 壳体的非正交性和传感器的安装误差以及传感器自身的非正交误差所组成。

由于惯性传感器在 IMU 几何组件中安装不当, 会产生不重合及非正交误差。交叉耦合是由惯性传感器敏感轴的非正交性引起的。因此, 惯性传感器 (加速度

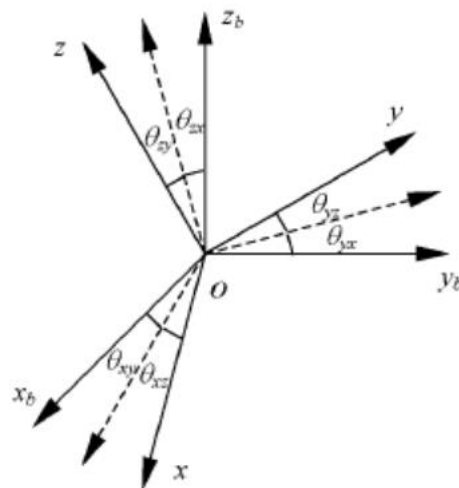
计或陀螺仪) 测量来自另一个轴的残余惯性测量值, 而该轴应该与其敏感轴正交。例如, 从 InvenSense 的 MPU-9250 芯片内部结构图可以看到该加速度计 (X、Y、Z 轴) 和陀螺仪分开制造, 因此加速度计和陀螺仪的坐标轴中心并不严格重合, 甚至加速度计不同轴也是分开加工, 坐标轴也不能保证完全正交。而且, 加工过程或多或少有误差, 如对称度不好, 产生零偏误差。

图34: 非正交性误差示意图



资料来源: 知乎, 民生证券研究院

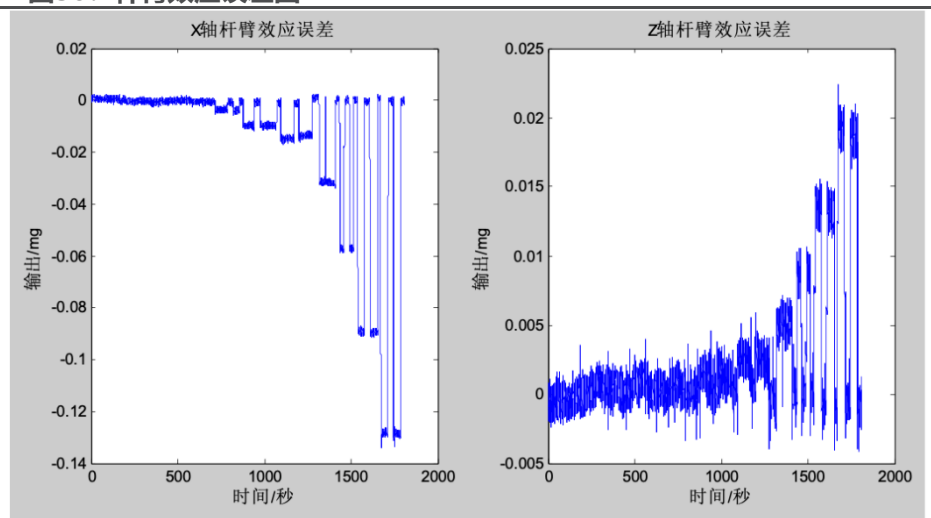
图35: 非正交误差原理



资料来源: 知乎, 民生证券研究院

MEMS-IMU 的杆臂效应是一项系统误差, 它的产生原因是 MEMS-IMU 的传感器是分立安装的, 因此载体在绕某轴旋转时, 传感器将会受到附加的离心加速度和切向加速度, 进而会引起加速度计和陀螺仪的输出误差, 误差正比与旋转角速率。在对陀螺进行旋转标定时, 观察到了典型的杆臂效应如下图 2.10, 其中转轴为 y 轴。

图36: 杆臂效应误差图



资料来源: 代刚《MEMS-IMU 误差分析补偿与实验研究》, 民生证券研究院

## 5.4 误差补偿的途径：算法与校准

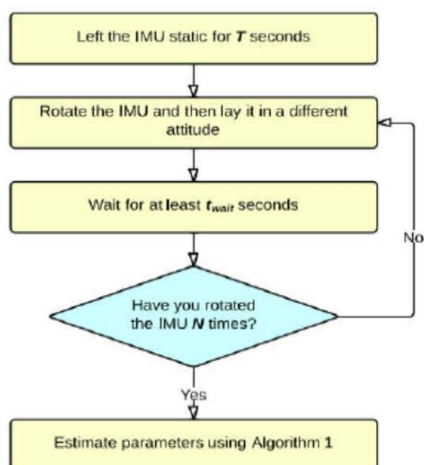
### 5.4.1 提高 MEMS IMU 精度有两种途径

1) 采用新材料、新工艺、新技术和新方法；

2) 通过建立合理的微惯性组合误差模型，采用软件算法修正来提高微型惯性传感器的精度，实验研究表明，一种好的误差模型及实验标定方法可使微型惯性传感器的精度提高 2~3 个数量级。在补偿惯性器件或误差时需要建立起其误差模型和进行模型参数辨识然后实施补偿，一般来说误差模型可以分为静态误差模型、动态误差模型和随机误差模型。对于静态误差模型和动态误差模型一般认为是与载体运动的速度、加速度等有关的确定性误差项可通过试验标定并补偿。对于随机漂移误差模型只能采用合理的模型辨识和参数估计方法。

算法优化存在难度，需要年为单位的积累，系统算法可以不断优化，形成模块化的信息，称为软件定义硬件，同时需要一定维护和技术服务。

图37：使用算法进行迭代优化



资料来源：CSDN，民生证券研究院

### 5.4.2 使用算法对误差进行校准：Allan 方差法

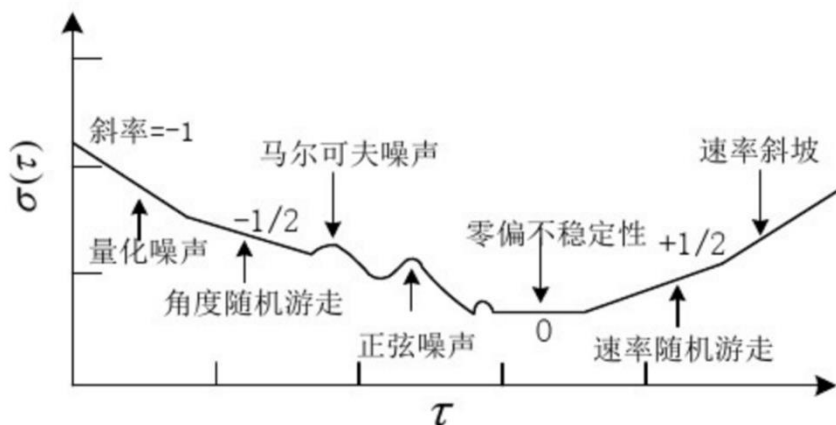
惯性传感器的随机误差作为随机过程被纳入导航滤波器，准确确定用于描述惯性传感器误差的随机过程参数至关重要。否则，估计算法将产生不准确的导航解决方案，而且随着时间的推移，其准确性会越来越低。

有几种方差技术可用于惯性传感器误差的随机建模，其中最简单且普遍的技术是 Allan 方差法。Allan 方差法利用均方根 (RMS) 随机漂移误差作为平均时间的函数。通过计算整个数据长度的 Allan 偏差，可以获得一条特性曲线，通常以对数-对数标度表示，显示平均时间与 Allan 偏差值的关系。通过进一步检查特征曲线，可以发现所获惯性传感器数据中的主要误差成分。

Allan 方差法可用于识别惯性传感器读出信号中可能出现的基本随机误差。此外，Allan 方差法还能对随机误差成分进行分类。具体来说，Allan 方差法可以描述惯性传感器测量中出现的五种随机误差项，分别是：量化噪声、角度随机游走、零偏不稳定性噪声，角速率随机游走，速率斜坡。

然而，一旦计算出不同误差项的 Allan 方差，获得的 Allan 方差就可以通过不同的模型来计算参数，从而更好地表示可纳入导航滤波器的随机过程。此外，Allan 方差还提供了关于各种误差项的类型和大小的信息。Allan 方差法已被用于识别和描述不同等级惯性传感器中的随机误差分量。Allan 方差法的主要缺点是在对基于 MEMS 的小型低成本 IMU 的随机误差进行建模时在统计上不一致。

图38：艾伦方差图对应的误差

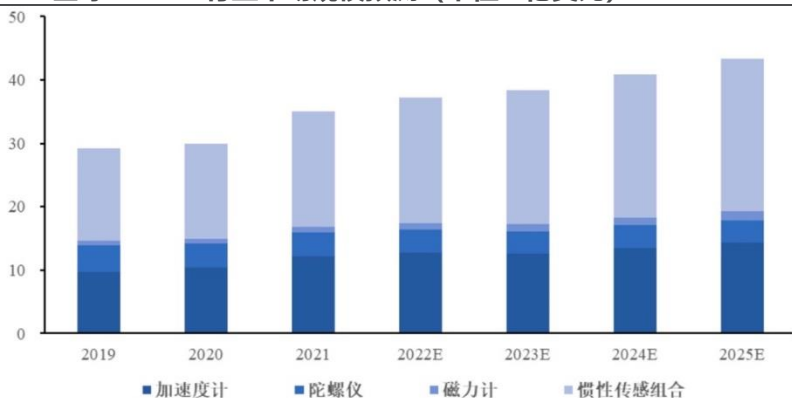


资料来源：知乎，民生证券研究院

## 6 IMU 市场空间

根据 Yole 发布的 status of MEMS industry 2022, 2021 年, 全球 MEMS 惯性传感器市场规模达 35.09 亿美元, 其中 MEMS 惯性传感组合所占规模过半, 并保持上涨趋势, MEMS 陀螺仪和 MEMS 加速度计市场规模占总市场规模的 45.50%。长远来看, 全球 MEMS 惯性传感器市场规模仍将保持一定增速, 并在 2024 年达到 40 亿美元左右。

图39: 全球 MEMS 行业市场规模预测 (单位: 亿美元)



资料来源: Yole Intelligence, Status of MEMS Industry 2022, 民生证券研究院

IMU 广泛应用于无人机、自动驾驶和机器人领域。Drone Industry Insight 数据显示, 2020 年全球无人机市场规模为 209 亿美元, 并将在六年内达到 413 亿美元, 预计 2020-2026 年复合增长率为 12.02%。根据 iimedia 估计, 2021-2025 年全球无人驾驶汽车市场规模复合增长率预计为 46.78%, 增长速度迅速拉升, 市场规模将在 2025 年实现 1200 亿美元的突破。

而由于目前中国惯导技术与国际领先水平仍然存在差距, 高端陀螺仪需求高度依赖进口, 仅有极少数国内公司具备成本和全产业链优势。2021 年国内 MEMS 市场前 30 大厂商中仅有歌尔股份有限公司、瑞声科技控股有限公司、武汉高德红外股份有限公司、台湾积体电路制造股份有限公司四家为本土厂商, 发达国家厂商在 MEMS 芯片设计、制造和产品性能上仍然具有显著优势。中低端陀螺仪则已基本实现了国产化。

表14: 国内惯导相关公司

公司名称	相关领域	发展情况/主要产品
敏芯股份	智能手机、消费电子产品等	MEMS 惯性传感器
睿创微纳	光电技术开发	非制冷红外热成像 MEMS 芯片等
星网宇达	信息感知、卫星通信及无人系统	信息感知、卫星通信及无人系统
理工导航	惯性导航	惯性导航系统及其核心部件
深圳导远科技	惯性导航和光电技术开发	为主流主机厂多款车型定点配套供货
上海戴世智能科技	无人机系统、汽车自动驾驶测试	已与上汽集团有战略合作
北京羲朗科技	军用惯导	与京东无人车等进行合作

资料来源: 行行查, 民生证券研究院

**表15：海外惯导龙头公司**

海外龙头公司	相关领域
<b>Honeywell</b>	Honeywell 产品线较广，主要产品包括 MEMS 惯性传感器、激光传感器及相关惯性传感器系统。陀螺仪方面，Honeywell 的 MEMS 陀螺仪是行业内战术级陀螺仪的标杆产品；加速度计方面，MEMS 加速度计和石英加速度计可达到导航级和战术级水平，石英加速度计是该产品的行业标杆产品。目前 Honeywell 正推动高性能 MEMS 传感器替代光学陀螺仪。
<b>ADI</b>	ADI 主要产品为 MEMS 陀螺仪和 MEMS 加速度计，技术水平领先，产品耐环境能力强，性能覆盖工业级和低端战术级，在工业级陀螺仪领域具备较大影响力。
<b>Silicon Sensing</b>	Silicon Sensing 主要产品为 MEMS 陀螺仪，技术较为先进，产品耐环境能力强，性能覆盖工业级，战术级。
<b>Sensoror</b>	Sensoror 主要产品为三轴陀螺仪模块和 IMU。产品主要以战术级为主。

资料来源：芯动联科招股书，民生证券研究

## 7 风险提示

1) **人形机器人需求不及预期。**人形机器人的终端需求场景没有找到合适的切入点，可能会导致人形机器人始终停留在实验室阶段，无法量产，影响上游零部件的市场空间。

2) **量产技术路线中对传感器精度需求较低导致单价波动。**传感器根据所需精度的不同，价格会有大幅差异，价格差异主要来自于精度的范围以及所需的工艺路径。当前人形机器人整机方案尚未定型，其次传感器采集的数据主要是作为对算法的补充，而人形机器人的算法迭代仍处于初期，因此最终量产技术中对传感器的精度、工艺路径的需求可能出现较大变化，导致实际单价出现波动。



## 插图目录

图 1: 机器视觉系统构造	3
图 2: iTOF 成像原理	5
图 3: 结构光投影三维成像图示	5
图 4: 立体视觉-双目成像原理	6
图 5: 特斯拉 Optimus 视觉外观	8
图 6: 特斯拉 Optimus 视觉画面	8
图 7: 优必选 WalkerX	8
图 8: 小米 Mi-Sense 深度视觉模组结构参考	8
图 9: 波士顿动力 Atlas 视觉外观	9
图 10: 波士顿动力 Atlas 视觉原理	9
图 11: 单目相机	10
图 12: 双目相机	10
图 13: 结构光相机	11
图 14: ToF 相机	11
图 15: 工业相机零部件组成示意图	12
图 16: 图像采集卡原理	13
图 17: 图像采集卡	13
图 18: CCD 图像传感器市场规模和头部厂商	13
图 19: CMOS 图像传感器市场规模和头部厂商	13
图 20: 图像处理芯片 (FPGA) 市场规模和头部厂商	14
图 21: IMU 外观图	17
图 22: MEMS IMU 拆解图	17
图 23: MEMS 陀螺仪内部结构	17
图 24: MEMS 陀螺仪外观	17
图 25: 光纤陀螺仪工作原理	18
图 26: 光纤陀螺仪拆解	18
图 27: 电容式加速度计内部结构	19
图 28: 芯动联科 MEMS 加速度计	19
图 29: IMU 等级分类及价格	19
图 30: IMU+GNSS 惯性组合导航系统原理	20
图 31: 确定性与随机性误差的来源	23
图 32: 三种典型的误差源	23
图 33: MEMS-IMU 误差分类	24
图 34: 非正交性误差示意图	27
图 35: 非正交误差原理	27
图 36: 杆臂效应误差图	27
图 37: 使用算法进行迭代优化	28
图 38: 艾伦方差图对应的误差	29
图 39: 全球 MEMS 行业市场规模预测 (单位: 亿美元)	30

## 表格目录

表 1: 机器视觉的四大功能	4
表 2: 机器视觉不同方案对比	7
表 3: 主要人形机器人的视觉方案	7
表 4: 奥比中光 3D 传感器上游零部件单价及成本占比	14
表 5: 奥比中光系列产品单价(2021)	15
表 6: 奥比中光部分零售产品	15
表 7: 埃科光电工业相机上游零部件单价及成本占比 (2022 年)	16
表 8: 埃科光电产品单价(2022 年)	16

表 9: 乘用车定位单元方案 .....	21
表 10: 商用车定位单元方案 .....	21
表 11: 人形机器人 IMU 方案 .....	22
表 12: MEMS IMU 误差类型 .....	25
表 13: 体硅 MEMS 制造工艺中产生的误差 .....	26
表 14: 国内惯导相关公司 .....	30
表 15: 海外惯导龙头公司 .....	31

## 分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

## 评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

## 免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

## 民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元； 518026