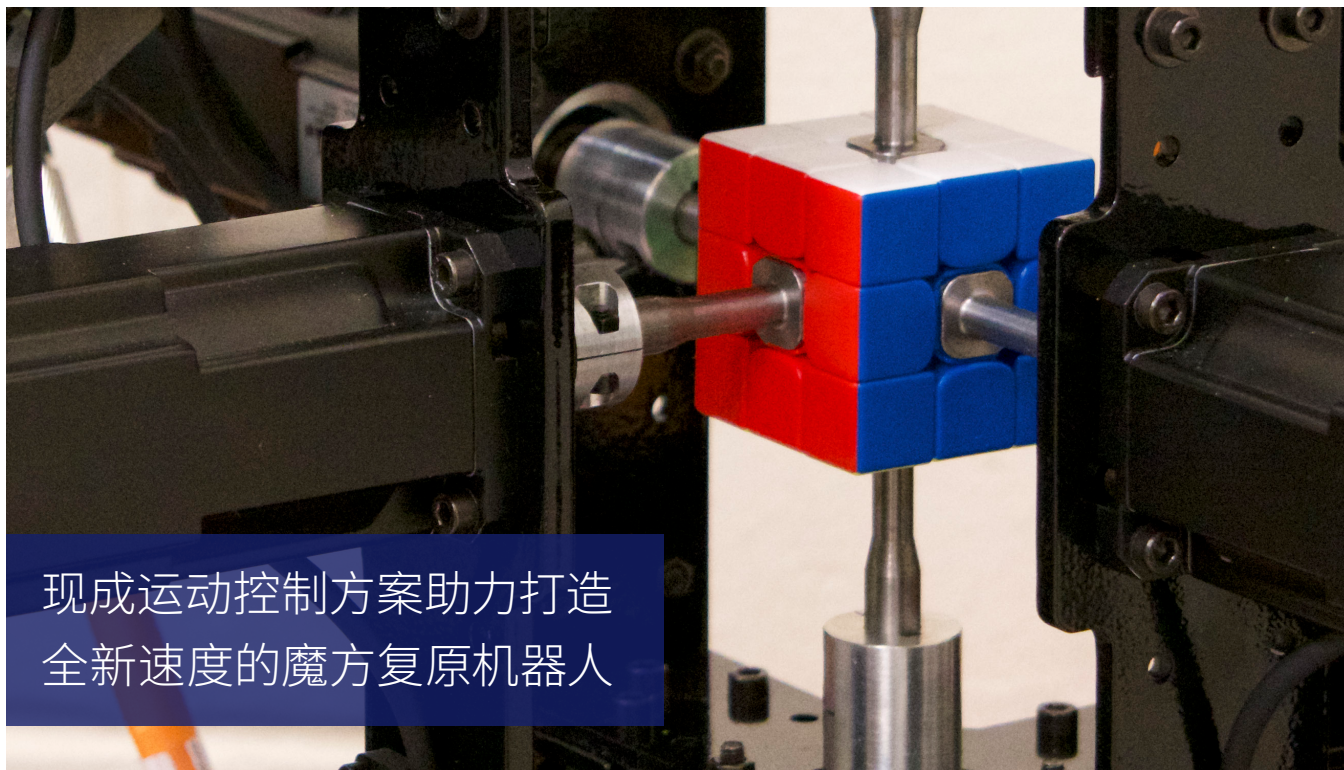




## 现成运动控制方案助力打造 全新速度的魔方复原机器人

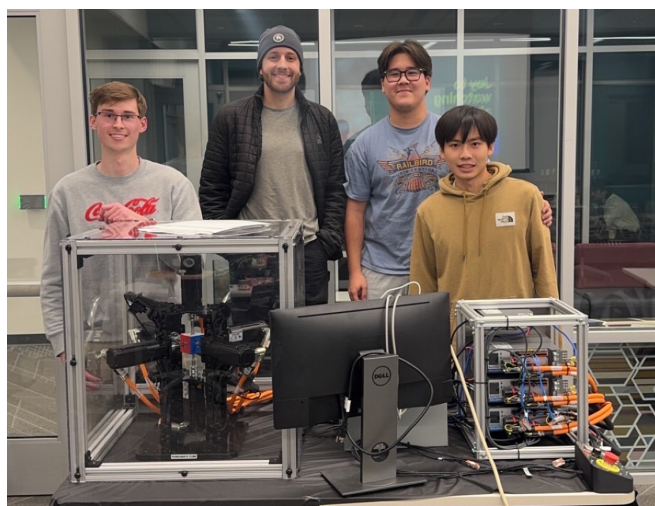
一组工程设计专业的学生立志设计并打造出打破世界记录的魔方复原机器人。最终，这套系统仅用 103 毫秒便完成了魔方复原任务，打破了此前的纪录，充分展现出以高性能运动控制为设计核心所能创造的无限可能。

打造魔方复原机器人系统，是对算法精度、机械速度与创新程度的综合考验。众多个人开发者、企业及学术机构都曾迎接这项挑战，创下多项令人瞩目的纪录。

当普渡大学的学生 Matthew Patrohay、Junpei Ota 和 Aden Hurd 立志打破 305 毫秒的世界纪录时，他们深知该目标极具挑战性。他们还具有清晰的洞察力。

他们了解，打破速度纪录的关键在于极致的加速能力与精准的控制效果。机器人需要具备亚毫秒级的控制环路、严格同步的时序，以及能在每次转动后实现瞬时稳定的高性能运动控制系统。

了解该团队如何将整套科尔摩根 2G 运动控制系统融入其设计中并最终使用现成组件成功实现全新速度。



## 突破亚秒级性能挑战

**要在眨眼间 (100 至 300 毫秒内) 完成魔方复原远非单纯提高速度那么简单。机器人需通过连续执行四个关键步骤来完成整套动作，且每个步骤都必须精准无误。**

首先，机器人需要通过相机和照明系统捕捉魔方状态。而且，照明系统需具备足够快的响应速度与亮度，以确保精准的色彩识别并最大限度缩短曝光时间。随后，系统需要分析数据并实时计算出理想路径，以实现极快的执行速度。在确认好路径后，系统将通过高速同步的多轴运动控制驱动六个独立控制轴，并控制好每个动作的扭矩和精确时序。通常情况下，机器人需要在各个动作间留出稳定时间，以防止过冲或位移偏差。然而，该团队采用了名为“过弯切角”的策略，使系统能在上一次转动尚未完全结束时就开始下一次转动。这就要求控制系统具备极快的响应速度和精确的反馈能力，以确保在动作交叠时仍可保持魔方稳定。

动作序列必须实现无缝衔接，同时能应对现实环境中的各种限制。视觉系统、网络通信及反馈环路均会带来延迟。魔方面旋转时会产生负载变化，作用力在各轴间发生转移。高速运转时机械应力达到峰值，特别是在执行过弯切角动作时。最后，在集成第三方组件时，必须对所有这些复杂因素进行管理，以确保整个系统能协调可靠地运行。

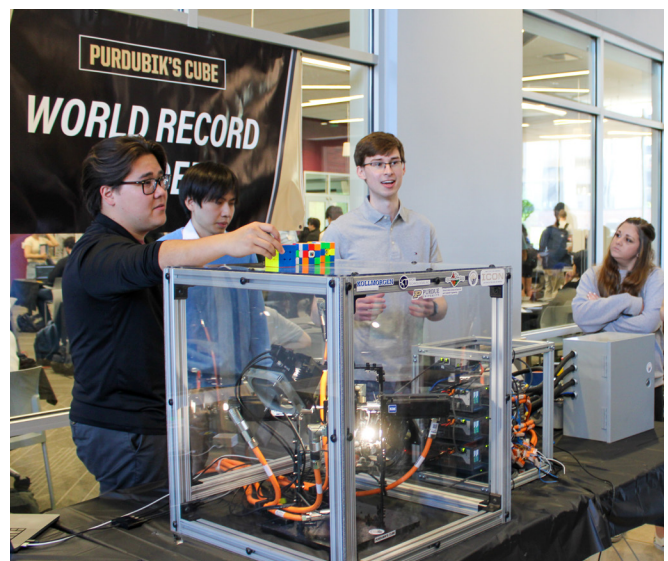
## 运动控制成为决定成败的关键

**从一开始，学生团队就意识到运动系统将是决定机器人能否突破速度纪录的决定性因素。他们知道必须采用具备高扭矩、低转子惯量的完整系统，并依托快速精准的控制和精确的位置反馈，才能够实现极限加减速。**

### 为什么使用 2G 运动控制系统？

他们评估了多家主流供应商的数百种电机与驱动器组合，并对相关指标进行了对比，其中包括：扭矩-惯量比、控制环路速度、反馈分辨率，以及在稳定情况下保持精准多轴同步的能力。

他们很快发现，**科尔摩根 2G 运动控制系统**（包含 AKM2G 伺服电机、AKD2G 伺服驱动器及 PCMM2G 运动控制器）具备独特优势，能够满足这些需求。



AKM2G 电机兼具出色的转矩密度及低转子转动惯量，可实现魔方面 90° 和 180° 转动所需的强劲加速及快速反向动作。但真正使该系统脱颖而出的是其驱动与控制环路性能。AKD2G 驱动器采用先进的控制环路架构且更新速度极快。这一特性使得系统即便在其他驱动器无法稳定运行的速度下，也能纠正位置误差并保持稳定。这些快速更新环路至关重要，因为其可确保机器人在每次动作后都能实现完全精准的瞬时稳定。

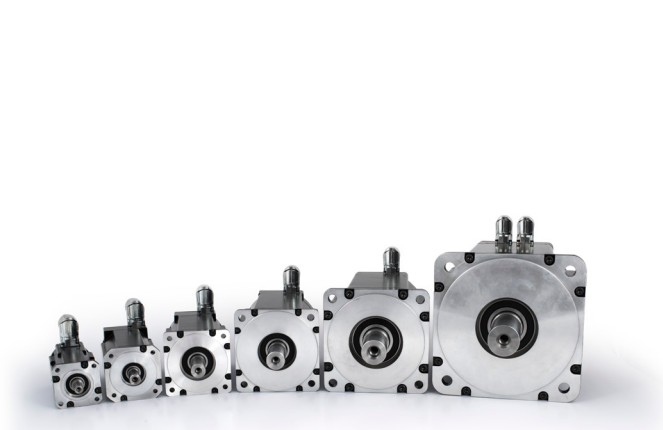
最后，PCMM2G 控制器可实现所有六轴之间的多轴协同控制与复杂指令调度。该控制器可提供同步运动规划、严格的时序控制以及与系统其他部分的快速通信能力。

对于这个挑战机械与计算性能极限的项目，这套现成系统可在所有维度实现预期目标：高峰值扭矩、低惯量、超快控制环路，以及精准的多轴协同。这也使团队能够专注于解决方案的工程设计，确保运动控制平台不会成为制约因素。

| 优势     |                             |
|--------|-----------------------------|
| AKD2G  | 灵活、易用、快速                    |
| AKM2G  | 更小体积、更高扭矩、更广速度范围、更高灵活性、更优能效 |
| PCMM2G | 高性能、无缝集成、即插即用功能             |



AKD2G 伺服驱动器



AKM2G 伺服电机



PCMM2G 运动控制器

寻找正确运动控制轨迹

将科尔摩根 2G 运动控制系统部署到位后，团队对多种运动控制轨迹进行了测试，以确定哪种方案能同时兼顾高速与稳定。对称梯形运动控制轨迹虽能实现快速加速，但在极端高速下也经常会出现过冲情况。S 形轨迹虽能减少抖动，却会引发不必要的迟缓现象。

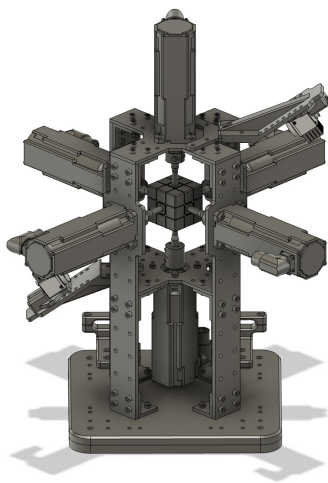
最终，经证实，非对称梯形运动控制轨迹是合适的方案。该轨迹将强劲加速与平缓减速相结合，使电机能够更快抵达目标位置，在不产生过冲或抖动的情况下实现瞬时稳定。

该轨迹与“过弯切角”策略深度融合，即在上个动作未完全停止时便开始下一动作。该策略能使总处理时间缩短数十毫秒，这也使其成为对运动控制策略影响较大的改进之一。

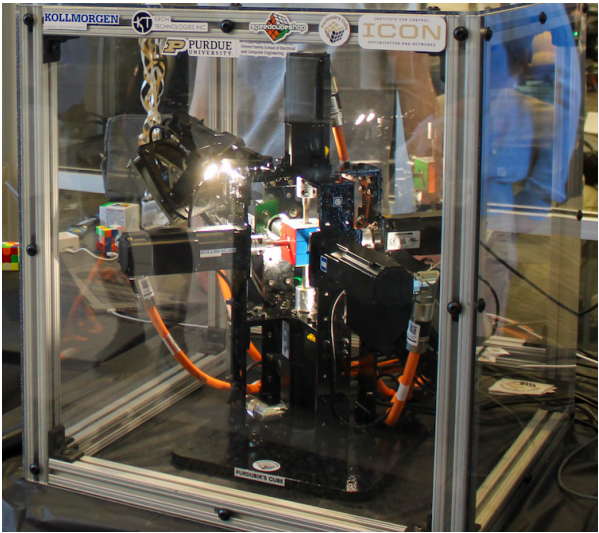
在这种性能水平下，每一微秒的延迟都至关重要。所有子系统间的紧密协同才可确保不会因无法预估的延迟而浪费任何时间。

# 高速运动控制的基础

机器人的运动控制在电机启动前就已开始。两台高速工业相机与定制 LED 照明系统协同工作，完成魔方表面数据的采集与处理。原始 RGB 色彩数据被转换为 HSV 色彩空间，以提升色彩感知的一致性，进而消除因亮度、阴影或拍摄角度造成的识别偏差。当视觉系统识别出魔方状态后，该解决方案随即被编码为紧凑字符串，通过用户数据报协议(UDP)即时传输至 PCMM2G 运动控制器。该运动控制器随后解析并执行指令序列，对所有六个轴进行实时同步协调。



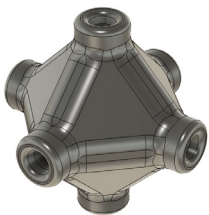
系统 CAD 设计



采用全聚碳酸酯安全防护罩，可在魔方运动期间保护操作人员免受高速碎屑伤害。

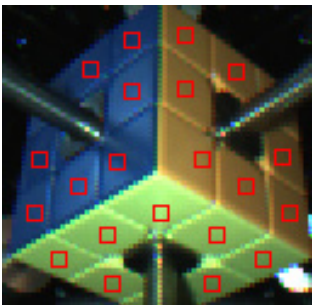


铝制耦合器

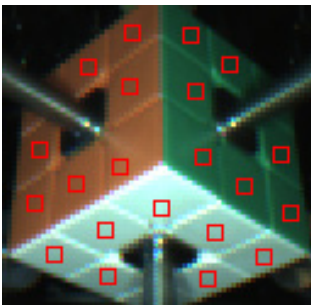


SIs 技术打印的魔方芯

整个检测与验证流程均可在 0.25 毫秒内可靠完成。该视觉与控制系统在首台电机启动前就完成了魔方状态解析，省去了运动控制过程中的重复计算环节，使机器人能够毫无迟滞地执行运动路径。



相机底部视角



相机顶部视角

在机械方面，基础结构必须满足速度与精确度方面的要求。一个高刚性且稳定的框架为高速驱动提供了基础，确保电机能充分发挥其扭矩与加速潜能。采用选择性激光烧结 (SLS) 技术打印的尼龙魔方芯与定制钢轴有效提升了螺纹保持力与结构完整性。经过特殊设计的铝合金联轴器可确保一致的对准与出色的扭矩传递。急停系统的配置也确保了高速测试的安全性与可重复性。

这些机械与视觉方案共同构建出稳定可预测的运行平台，使运动控制系统能够在其性能极限下运行，以可重复的精度实现各种强劲运动控制轨迹。

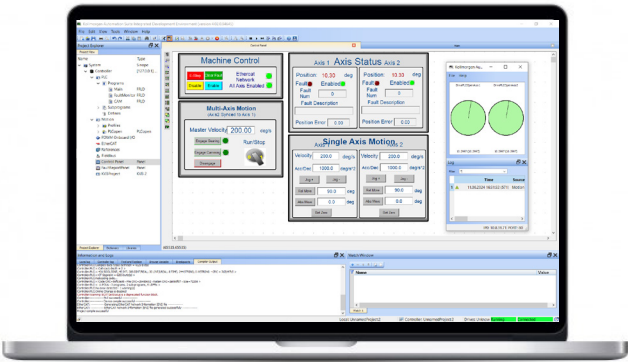
| 魔方复原耗时分解 |                |                                                                                                |
|----------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 步骤       | 时间 (ms)        | 说明                                                                                             |
| 1        | 0.000          | 按下按钮 - 系统执行软件消抖处理, 当信号电压降至 5V 以下 (即 AKD2G 驱动器的逻辑低电平) 时, 开始正式计时。                                |
| 2        | 0.125          | GPIO 延迟 - AKD2G IO 读取 24V 逻辑电平的信号, 持续检测到低电平信号 (低于 5V)。此处所用端口设置为 125 微秒内判定输入信号是否已关闭。            |
| 3        | 0.250          | EtherCAT 延迟 - AKD2G 向 PCMM2G 发送 IO 低电平信号。PCMM2G 随即启动 LED 系统, 并通过发送 UDP “开始” 信号通知主计算机, 复原流程已开始。 |
| 4        | ~0.904         | UDP 延迟 - 指 “开始” UDP 信号从 PLC 发送至主计算机所需的单向传输时间。                                                  |
| 5        | 4.180          | 图像采集时间 - (包含通信开销、软件触发信号发送、曝光时间、相机内部处理及缓冲区传输)。                                                  |
| 6        | 0.250          | 颜色识别时间 - 确定魔方的状态。                                                                              |
| 7        | 0.477          | 解决方案生成时间 - 计算复原魔方所需的转动次数。                                                                      |
| 8        | ~0.904         | UDP 延迟 - 通过 UDP 协议将解决方案发回 PLC 所需的单向传输时间 (即向 PLC 下达具体动作指令)。                                     |
| 9        | 0.250          | EtherCAT 延迟 - 指启动运动控制所需的通信开销。                                                                  |
| 小计       | <b>7.34</b>    | <b>从按钮按下至电机启动的运动控制前总耗时。根据示波器数据, 我们可确定此阶段总耗时必须控制在 7.34 毫秒内, 因此步骤 1-9 中各环节的估算值均在此数值之内。</b>       |
| 10       | ~96.000        | 运动控制执行 - 完成魔方复原。                                                                               |
| 11       | 0.250          | EtherCAT 延迟 - AKD2G 通过伺服驱动器反馈向 PCMM2G 发出运动控制执行完毕信号。                                            |
| 12       | 0.050          | GPIO 延迟 - PCMM2G 逻辑控制器将时序输出线路置为低电平, 发出复原流程完成信号。这里使用的 ADK2G IO 线路有 50 微秒的逻辑低电平输出延迟。             |
| 小计       | <b>96.051</b>  | <b>运动控制执行总耗时 (含信号传输与响应时间)。</b>                                                                 |
| 总计       | <b>103.391</b> | <b>实测总复原时间: 自按钮按下至魔方完全复原状态。我们知道步骤 10-12 的精确耗时为 96.051 毫秒, 因此任何估算值均将在此数值之内。</b>                 |

## 快速设置和无缝集成

该项目最值得称道的一点在于, 尽管团队成员此前并没有与工业运动控制相关的经验, 却仍能快速将系统投入运行。从第一天开始, 他们便能使用 WorkBench 安装科尔摩根自动化系统组件集成开发环境 (KAS IDE), 通过该可视化操作界面实现对六台电机的点动控制, 从而确认硬件配置无误且已就绪等待参数调校。

在随后数周内, 他们使用 KAS IDE 完成了六轴运动控制编程, 实现了驱动器同步, 并执行了定制运动控制轨迹, 而且几乎未依赖外部技术支持。凭借清晰的文档、直观的工具与可靠的硬件, 该团队能将精力集中于工程方案优化, 而不是耗费在设备故障排除环节。

最终, 他们仅用短短数周就完成了从硬件安装到突破性纪录的跨越。这不仅体现了该团队的非凡智慧, 也印证了科尔摩根 2G 运动控制系统的易用性与稳定性。



## 用现成组件实现全新速度

以科尔摩根 2G 运动控制系统为核心，该机器人系统在短短 103 毫秒内完成了 21 个协调动作，远超先前纪录。

这项成果归功于该团队在硬件架构、运动控制策略与协同控制三大领域实施的十余次迭代优化。最初复原耗时 5.1 秒，通过系统化调校辅以高速摄像技术与自上而下的调校策略，充分释放伺服电机与驱动器的性能潜力，最终将时间缩减至 200 毫秒以内。

每个动作（无论是 90° 快速翻转还是 180° 翻转）均实现了强劲加速、瞬时稳定和精准定位。机器人能够实现所有六轴的精准同步，平稳应对负载动态变化，且每次运行结果都稳定一致，具备高度可重复性。

最值得注意的是，机器人依靠现成组件便能完全实现如此卓越的性能。这充分证明只要正确运用先进技术，即便没有定制硬件，也能实现具有破纪录意义的运动控制表现。

### 复原耗时演进

| 复原耗时 (秒) | 注意：                            |
|----------|--------------------------------|
| 5.100    | 首次成功复原。                        |
| 1.560    | 4 分钟后 — 基于初步探索的首次加速尝试。         |
| 1.290    | 3 分钟后 — 进一步提升速度。               |
| 0.660    | 3 天后 — 仍采用保守调校，且未启用高速相机。       |
| 0.475    | 启用高速相机。发现各动作之间有过长的空闲时间。        |
| 0.346    | 三轮复原中首轮完成。                     |
| 0.300    | 当晚 — 逼近世界纪录。                   |
| 0.296    | 当晚 — 仅凭基础性运动控制调校即突破 0.305 秒纪录。 |
| 0.282    | 采用定制高强度弹簧与 PLA 芯。优化了稳定时间。      |
| 0.202    | 采用基础过弯切角技术 — 未改变运动控制轨迹仍实现显著提升。 |
| 0.178    | 基于现有运动控制轨迹进行强劲过弯切角测试。          |
| 0.152    | 进一步优化过弯切角 — 逼近系统失稳阈值。SLS 芯。    |
| 0.119    | 基于电机性能极限重构运动控制轨迹。保守的过弯切角。      |
| 0.103    | 最终记录的复原时间。更强劲的过弯切角。            |

## 成就下一次技术突破

该项目证明，只要先聚焦于运动控制，并选择正确的平台与之进行整合，就能创造无限可能。凭借现成组件、精准的工程设计及对核心要素的精准把握，即便是在极严苛的应用场景中，您也能让机器人实现卓越的性能表现。

无论是攻克自动化、机器人还是医疗领域的难题，您都不用孤军奋战。科尔摩根可为您提供相关的技术、工具和支持，帮助您打造值得信赖的运动控制系统解决方案。当您准备挑战运动控制技术极限时，我们将助您打造非凡之作。

## 准备好向前迈进了吗？

联系科尔摩根，与运动控制专家讨论您在伺服驱动应用方面的需求和目标。

## 关于科尔摩根

作为 Regal Rexnord 旗下品牌，科尔摩根在运动控制领域拥有 100 多年的经验，致力于提供高性能且可靠的电机、驱动器、AGV 控制解决方案和自动化平台，享誉业界。我们提供的突破性解决方案在性能、可靠性和易用性方面更胜一筹，为机器制造商提供无可争议的市场优势。