

# 基于笛卡尔坐标控制的外感位姿测量三自由度电气驱动运动平台

Eduardo Izaguirre, Luis Hernández, Ernesto Rubio and Orlando Urquijo

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba

**摘要：**本文基于外感受测量系统，提出了一种三自由度电气驱动的并联机器人运动坐标控制方案。用逆运动模型从时变的任务空间轨迹中获得所需的关节位置坐标。所提出的任务空间内的这个级联控制方案是基于双环的。其中，内环包括一个解耦关节的位置控制，而外回路的设计则是为了得到一个适当的任务空间轨迹追踪。为了避免对运动学正解的实时计算，用惯性传感器和光学编码器装置来提供准确的末端执行器的位姿测量。该实验的结果展示了所提出的控制方案在工业的运动跟踪应用程序中的突出表现。

**关键词：**笛卡尔坐标控制 外感受测量 运动平台 三自由度并联机器人

## 1. 引言

近年来，对并联机器人的研究越来越重要。人们发表了成百上千的研究论文，建造了许多样机，发明了新拓扑，他们的应用也在不断增加。

并联运动机床(PKM)有着良好的刚性，准确的运动，高移动抗拉强度，高精度和可重复性，但它也带来了严重的挑战，如有限的工作区域，在工作区及运动学和动力学建模中的奇点。从控制方案的角度来看，PKM的控制算法不一定能在关节空间坐标或是任务空间坐标中发展。在关节空间控制中，每一个关节都能在对不确定性和未建模的动力学的较差补偿下，被当作解耦独立的单量输出单量输入的控制回路。任务空间方案提出了直接逆动态控制，与关节空间动态模型补偿或任务空间动力学模型补偿。笛卡尔控制方案通常需要通过正向运动学，（包括收敛问题和高计算时间）对末端执行器进行联机数学计算。因此，笛卡尔控制方案在实时控制中是不适用的。

并联机器人在运动模拟器领域有许多应用，基于模型的控制现在被用于确保准确的路径追踪，但控制的质量强烈依赖于模型的保真度，而这在实践中不一定能实现。在轨迹控制中实施非线性方法和智能算法需要相对较高的计算工作量，且其在工业实时应用和采样时间上也有所限制。

本文通过测量实时运动追踪应用程序中移动平台的直接位姿，提出了一种运动任务空间控制方案，此方案中机器人完整动态模型是非必要的。本文还展示了电气驱动三自由度工业并联机器人的轨迹控制的所求结果

本文的组织结构如下：第一部分是引言；第二部分阐述了机器人的主要规格并描述了逆运动学（IK）方程；第三部分首先介绍了电气驱动系统的动态模型，其次介绍了关节空间中解耦位置控制方案，再次以足够的惯性传感器和光学编码器组合测量移动平台的位置及方向，提出了级联任务空间；最后，运动跟踪应用程序中的实验结果展现了该系统的良好性能。

## 2. 机器人描述及 IK 模型

### 2.1 并联机器人体系模型

研究中的机器人系统是由线性气动执行器驱动的自由度并联机器人组成的。图一展示了运动模拟器及其相应的 CAD 模型在 MSC. Adams 软件中的发展，它们随后被应用于多样的模拟控制方案。这个系统的基本数学表达包括逆运动表达和相应的气动伺服模型，如驱动器的动态模型，这两者都被用来实现该运动控制循环。

固定底座是由三气动运动链继 RPSU-2SPS 架构连接到移动平台上的。如图二所示，底座坐标框架被设计为  $Oxyz$  框架，固定在底座中心，该坐标框架中  $Z$  轴指向垂直上方， $X$  轴指向平台后方。相似地，一个运动坐标框架  $Px'y'z'$  以运动平台为中心， $Z$  轴垂直于末端执行器。经过简化， $z$  和  $z'$  轴方向都指向相同的单位矢量。

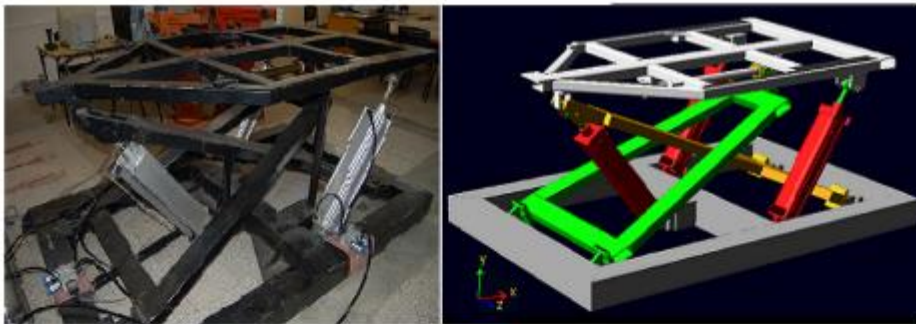


图 1 三自由度并联平台和它的 ADAMS 虚拟机模型

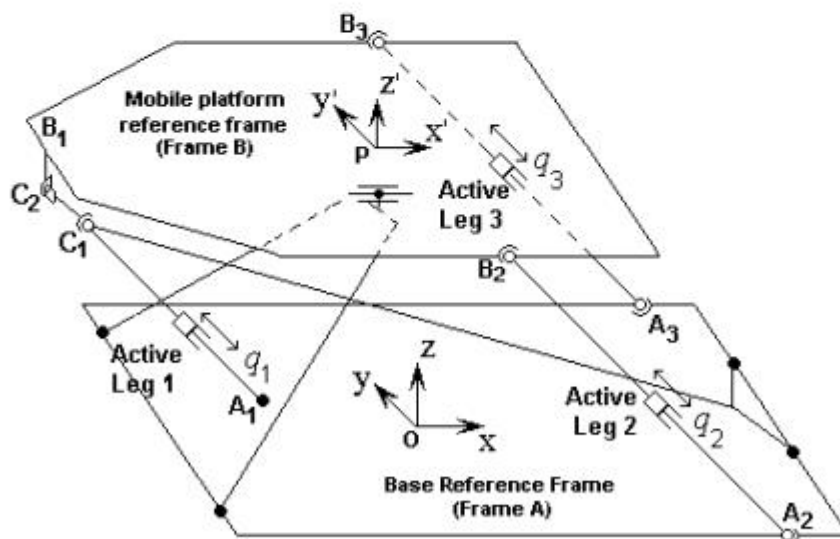


图 2 TPSU-2SPS 三自由度运动平台的运动学结构

关节采用双作用气缸驱动，其线性位移会产生机器人的三自由度，包括围绕

X' 和 Y' 轴旋转，分别由横摇（ $\theta$ ）和纵摇（ $\phi$ ）角度表示，以及沿 Z' 轴线性位移，定义为变量 h。因此，运动平台可以模拟与虚拟现实环境对应的不同场景，这些场景显示在位于可容纳两人的机舱内、牢固地附着在移动平台上的液晶显示器。

这种机器人是森普公司为娱乐和驾驶模拟器目的而开发的工业运动模拟器。

表 1 总结了森普-PKM 最重要的特点和技术参数。

描述	参数
末端执行器的初始高程	1070mm
驱动器的加速度	980mm/ s <sup>2</sup>
最大的纵横摇角度	$\pm 18 \text{ deg}$
运动平台的高程	$\pm 215 \text{ mm}$
机器人的总质量	1034kg
Pay-负载/质量关系	2.18

表 1. 并联机器人的主要特征

值得注意的是，良好的负载能力和相对小的工作空间都是并联机器人的典型特点。

## 2.2 逆运动学表达式

并联机器人的运动学关系定义了关节变量（q）和笛卡尔空间中末端执行器质量中心的相应位置（x，y，z）及角向（ $\theta$ ， $\phi$ ， $\psi$ ）之间的关系。

并联机器人的运动学关系确定关节变量（q）和相应的位置（x，Y，Z）和端部执行器的质量在直角坐标空间中心角度取向（ $\theta$ ， $\phi$ ， $\psi$ ）之间的关系. [11]

对于 n 轴并联机器人，逆运动学关系 $\Gamma^{-1}$  1 描述了到达移动台的指定姿态所需的关节坐标，并且可写成：

$$\mathbf{q} = [q_1 q_2 q_3 \cdots q_n]^T = \Gamma^{-1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \theta, \phi, \psi) \quad (1)$$

正向运动学（FK）解法  $\Gamma$ ，可以计算出机器人的关节数量。然后根据（1），FK 可表达为：

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x} \mathbf{y} \mathbf{z} \theta \phi \psi]^T = \Gamma(\mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2 \mathbf{q}_3 \cdots \mathbf{q}_n)^T \quad (2)$$

图 3 展示了制动器的位移和活性腿部的闭环矢量。已知初始关节位移( $L_{oi}$ )和 IK 解法中的向量力  $L_i = \|A_i B_i\|_2$ ，关节变量可以通过评估 $\mathbf{q}_i = \pm L_i - L_{oi}$ 得到。然后，对于每个运动链，矢量函数可以通过将所述致动关节坐标表达为直角坐标（x）来公式化，该直角坐标定义了移动平台的位姿。

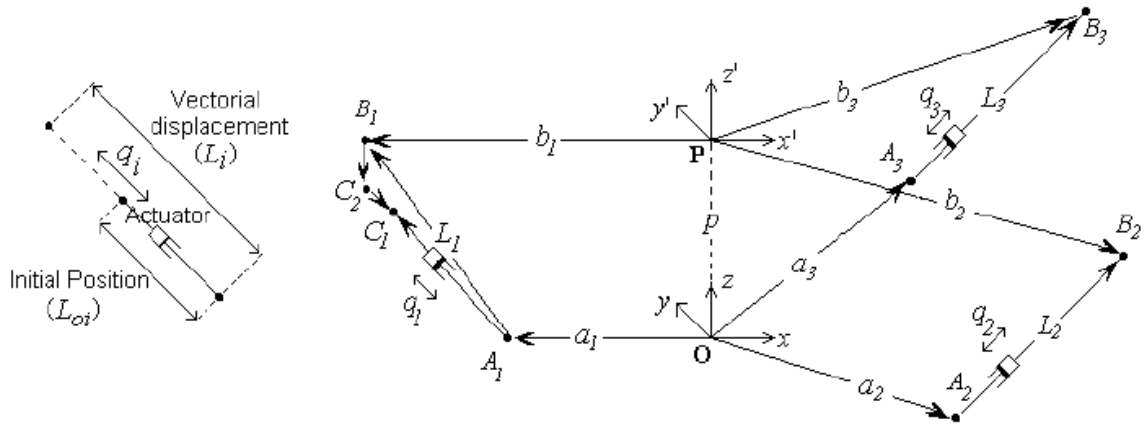


图 3 联合位移和闭环矢量

IK 方程的验证和 3-DOF 并联结构的完整逆运动学的研究可以如[12]所示，包括奇点的分析，其中展示了机器人工作空间中非奇异结构的存在。

根据等式 (1) 的可以得出关系式  $AIBI = \Gamma^{-1}(x)$ ，来获得所述机器人的逆运动学模型。

$$\overrightarrow{AB_i}|_{R_A} = \overrightarrow{OP}|_{R_A} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_i}|_{R_B} - \overrightarrow{OA_i}|_{R_A}; \quad i = 1 \dots 3 \quad (3)$$

结合矢量公式 (3) 和旋转矩阵 ARB Roll-Pitch-Yaw，可建立以下基于位移的方程：

$$q_1 = \pm \sqrt{(2076 - \lambda_0 - 940c(\varphi))^2 + (740 + h + 940s(\varphi))^2} - L_{o1} \quad (4)$$

$$q_2 = \pm \sqrt{(1397 - \lambda_0 + 720c(\varphi) + \lambda_1)^2 + \lambda_2^2 + (\lambda_3 - \lambda_4)^2} - L_{o2} \quad (5)$$

$$q_3 = \pm \sqrt{(1397 - \lambda_0 + 720c(\varphi) - \lambda_1)^2 + \lambda_2^2 + (-\lambda_3 - \lambda_4)^2} - L_{o3} \quad (6)$$

$$\cos(.) = c(.); \quad \sin(.) = s(.)$$

其中：

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \sqrt{1672^2 - 1720h - h^2} \\ \lambda_1 &= 500s(\theta)s(\varphi); \quad \lambda_2 = 500c(\theta) - 500 \\ \lambda_3 &= 500s(\theta)c(\varphi); \quad \lambda_4 = 720s(\theta) + 945 + h \end{aligned}$$

控制命令语句都在关节空间中执行，而机器人运动被指定在任务空间中，这

就是为什么强烈要求在控制方案中执行逆运动学模型-IKM-，以便在末端执行器的给定位置和方位找到关节位移的相应集合。

### 3. 关节空间定位控制

通过比例阀的气动缸的位置控制集中于机械系统运动学和独立电-气动的动力学，满足了许多工业应用[11]的定位精度。

本节中的解耦位置关节控制器的设计集中在将对动力学相互作用的稳定性维持在令人满意的水平，以及尽量减少由可能出现的负载变化造成的干扰。

给定预期的路径轨迹，所需的致动器的位移由 IKM 计算，并且每个独立的反馈回路可以通过给定电 - 气动致动器的转移函数的极点配置方法设计。

#### 3.1 执行器动态识别

电 - 气动系统的线性化版本是通过实验识别来发展的。来自阀的输入电压  $U(s)$  位置的传递函数  $Y(s)$  是基于以前的工作发展得到，首先是在二自由度气动平台[13]，随后延伸到三自由度运动模拟器。伺服气动执行器的模型采用以下形式：

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{A_1 G_1 / C_1}{\tau_1 s + 1} + \frac{A_2 G_2 / C_2}{\tau_2 s + 1}}{s \left( Ms + b + \frac{A_1 K_{1y} / C_1}{\tau_1 s + 1} + \frac{A_2 K_{2y} / C_2}{\tau_2 s + 1} \right)} \quad (7)$$

时间常数计算：  $\tau_1 = K_{1p} / C_1$ ；  $\tau_2 = K_{2p} / C_2$ 。

$P_1; P_2$ : 气缸室压力 (Pa)

$A_1; A_2$ : 每个室的活塞面积 (m<sup>2</sup>)

$M$ : 负载质量和活塞 (kg)

$b$ : 持续粘滞摩擦力 (N s/m)

常数  $G_1, G_2$  (公斤/ SM<sup>2</sup>) 和  $C_1, C_2$  (公斤/ SPA) 是由过流阀的空气质量流量的偏导数得到的：  $Q_m = F(X; P_{input}; P_{out})$ 。另一方面，常数  $K_{1p}, K_{2p}$  (公斤/ PA) 和  $K_{1y}, k_{2y}$  (公斤/米) 是根据制动器的位置，通过对有理想气压和体积变量的气体的状态方程的分化得到的 [14]。

对于动态实验，每个气动制动器都被单独测试，PRBS 输入信号被应用于产生对完整的伸长伺服气动制动器的持续励磁；另外，以流阀的欠重叠特性的影响也被用来开发这个模型[14]。线性化和模型降阶后，电 - 气动系统的动态行为可以通过以下的三阶方程描述：

$$G_D(s) = \frac{k}{s(s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2)} \quad (8)$$

$\omega_n$  和  $\xi$  分别表示系统的无阻尼固有频率和阻尼比,  $k$  是系统增益。由闭环实验识别得到的相应的传递函数如表 2 所示。

### 3.2 分离位置控制

因为不能忽视除了系统性能的退化外的执行器之间的交互作用, 位置控制器的设计要考虑到有足够的鲁棒性以减少电 - 气压驱动的操作点周围以及有效载荷的变化产生的循环扰动的动态相互作用的影响。

位置控制器的设计是通过极点配置进行, 其中闭环性能的复共轭极点是  $\xi = 0.7$  和  $\omega_n = 10$  弧度/秒, 并最大限度地提高相位裕度以保证必要的鲁棒性。该控制器的传递函数以方程形式 (9) 被总结在表 2。

$$G_C(s) = \frac{k_p(s^2 + a_1s + a_0)(s + k_i)}{s(s + \omega_a)^2} \quad (9)$$

Active Legs	Position Controllers ( $G_C$ )	Actuator Dynamics ( $G_D$ )
Actuator 1	$\frac{265(s^2 + 8s + 253)(s + 3)}{s(s^2 + 147s + 6267)}$	$\frac{246}{s(s^2 + 7.7s + 253)}$
Actuator 2 and 3	$\frac{32(s^2 + 8s + 1349)(s + 3)}{s(s^2 + 147s + 6267)}$	$\frac{2008}{s(s^2 + 7.3s + 1349)}$

表 2 控制器和电 - 气动系统的传递函数

已知控制器的传递函数  $G_C(s)$  和制动器的传递函数  $G_D(s)$ , 就能实施图 4 的运动关节空间控制计划。80Hz 截止频率的低通二阶滤波器  $F(s)$  被嵌入正向通道上, 来限制指令信号振幅过大, 以免超过阀门的流量带宽。

图 4 的运动控制方案有许多优点。例如, 使用独立的关节控制能保存不同关节的通信。此外, 由于控制器的计算负载可能被减小, 只有低成本硬件才被用以实现实时和高计算速度的工业应用。最后, 由于关节的控制器一般具有非常相似的配置, 独立的关节控制具有可扩展性。

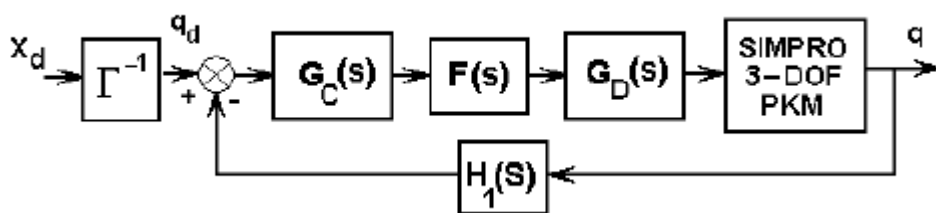


图 4. 关节空间位置控制方案

每条腿都由气缸 FESTO DNC - 125 - 500 驱动，该气缸由 MPYE - 5 - 3 / 8 比例流量阀控制，关节的位移是由 MLO - POT - 5000 线性电位计以  $\pm 0.01$  毫米的精度测量的。控制算法是基于 dsPIC 30f4013 专用微处理器在 120 MHz 的高速嵌入式控制器中运行实现的，即如图 5 所示的硬件结构。

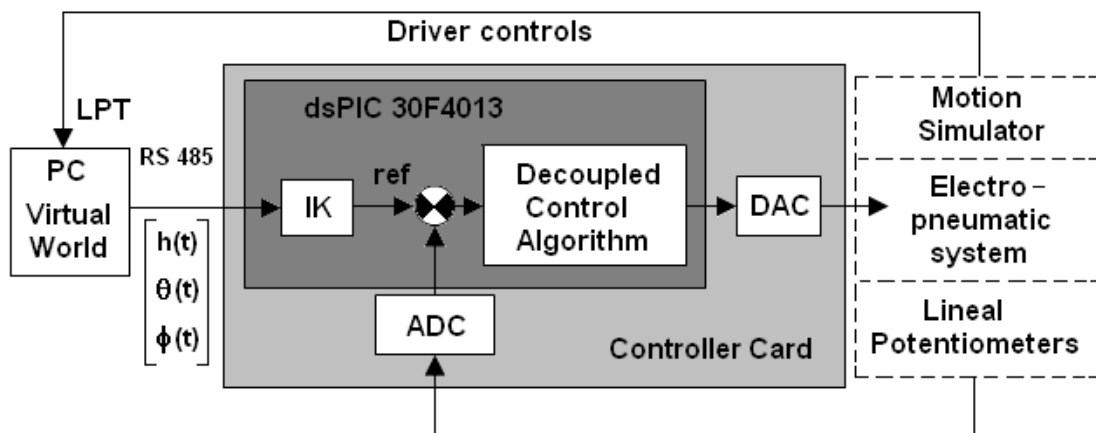


图 5 基于嵌入式控制器的硬件结构

图 6 展示了在具有恒定的幅度和频率的输入信号的预滤脉冲波时的关节位移，此时达到了零误差稳态。实验还探讨了制动器间动态相互作用时，闭环系统的预期鲁棒性。

由于不可避免的机理的制造公差，建模误差，回差和关节的间隙，只有实现解耦位置控制方案才能得到比较大的跟踪误差。图 7 展示了在发出脉冲串和正弦命令信号时，末端执行器的定位和轨迹跟踪分别出现的较大坐标误差。因此，仅通过解耦关节控制，移动平台的位姿不能得到有效控制。

所以说，级联控制方案通过在任务空间中采用双回路的控制体系结构，实现运动跟踪的目的。



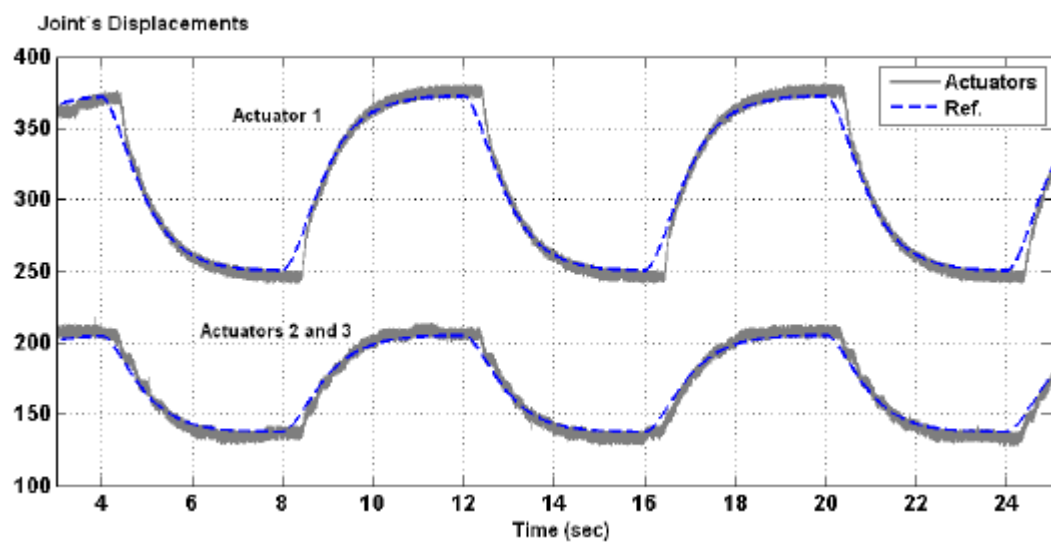


图 6. 解耦位置控制实验中零稳态的关节误差。

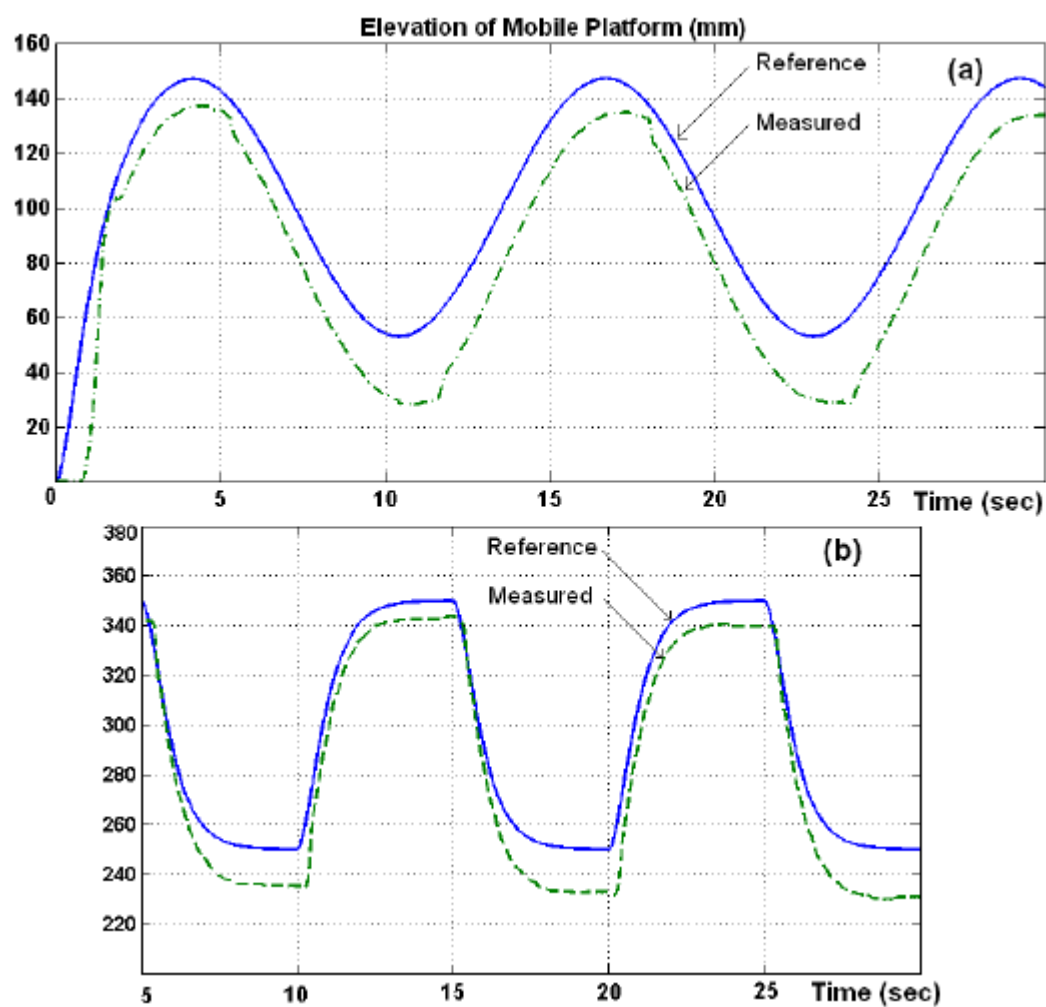


图 7 解耦关节控制跟踪 (a) 和定位 (b) 的笛卡尔误差。

#### 4. 笛卡尔空间控制



任务空间控制的目标是设计一个反馈控制器，来实施末端执行器的运动  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  使其尽可能密切地追踪期望的移动平台的运动  $X_d(t)$ ，从而使规范误差在测量的末端执行器误差和要求的末端执行器误差之间。所以，笛卡尔空间控制确保了直接任务控制，从而比关节空间控制更准确[8]，[15]。

本节中提出了设计于任务空间坐标中的控制方法，这些方法既不需要机器人完整动态模型，也不需要 FK 在线计算。从而也能够做出一个合适的外部测量系统来提供移动平台位姿信息。

#### 4.1 运动任务空间控制方案

图 8 表示出了所提出的任务空间控制方案的示意性框图，内环作用于位置，外环作用于轨迹。内环设计对模型的不确定性和干扰具有足够的鲁棒性（请参阅 3 部分），而外环补偿笛卡尔的干扰，使跟踪误差最小化。

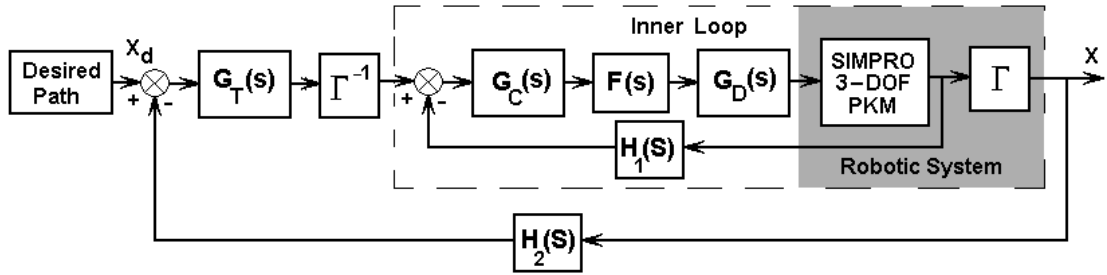


图 8 基于两个循环的任务空间控制方案

在外环进行的跟踪控制算法实现了笛卡尔轨迹的渐近跟踪；在没有改变内环的情况下，完全自由地修改外环控制来实现其他目标。例如，额外的补偿条件可用来增强在参数不确定性，未建模动态和外部干扰情况下的稳定性。外环控制也可以被修改来实现其他目标，如任务空间轨迹的零误差跟踪，调节运动和力度等。

#### 4.2 末端执行器位姿测量

在实时应用中，对 PKM 运动学正解进行在线计算需要高性能的计算机硬件，此外，基于正向运动学的任务空间控制受到数值估计误差和几何误差的影响，这都是并联机器人应用中正向运动学问题[1]的典型特征。这些方案中有很多已经在模拟中或实验室测试平台上被证明了，但不常用于工业运动平台[3]。

基于 J. Gao[16]中的理论，本文提出了用由光学编码器和惯性测量单元组成的外感知觉系统来测量移动平台位姿的方法。

MTI Xsens 公司的惯性运动跟踪传感器被用来提供末端执行器（图 9）的方向，而三个增量光学编码器提供了由三角关系决定的移动平台的评估信息。传感器的安排示于图 12 中，其中特别值得注意的是由末端执行器代替传感器，以避免干扰运动可能产生的风险。

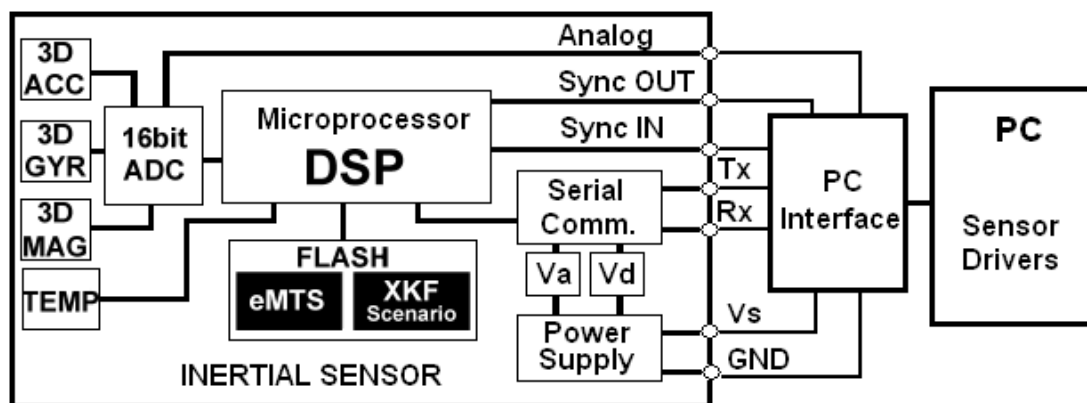


图 9. 惯性传感器原理框图

图 10 展示了 IMU 和编码器的位置，这两个是沿 x 轴对齐的，请注意，IMU 的连接点与移动平台的中心坐标框架 P X' Y' Z' 重合。

由于该光学编码器和惯性测量单元的组合，一个快速、准确的末端执行器系统能够及时被使用来达到控制的目的。

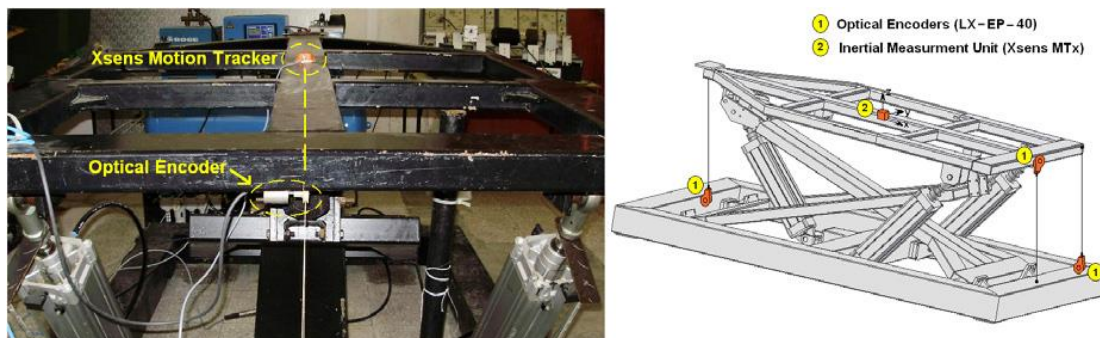


图 10. 位于运动平台的用来测量末端执行器的传感器的布置。

## 5. 数字控制问题

稳定运行下的位置控制满足以下条件： $Q(t) - Q_d(t) = 0$ ； $\forall T > 0$ ，此假设下，数字化设计的闭环控制系统由一个简单，但令人满意的近似内环的结构来执行，即解耦位置控制回路的动态行为由外部环[17]中的一个延迟单元表示， $Q(k) - Q_d(k-1) = 0$ ； $\forall K > 0$ 。因此图 8 的控制方案是由图 11 的等效数字系统简化而来的。

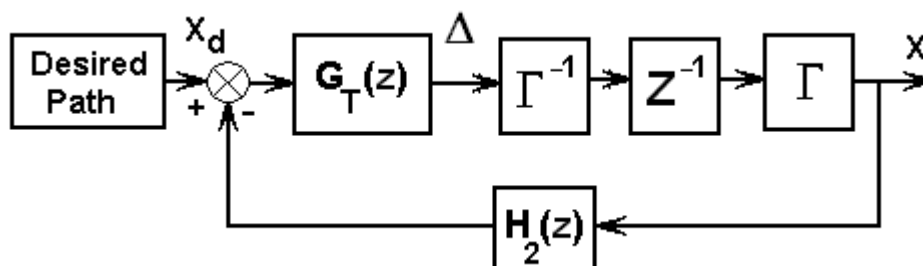


图 11. 内环动态近似的数字笛卡尔控制方案

因为在稳定状态下跟踪误差应该为零，如公式（10），纯积分器由简单的数字控制器实施。相应的控制法如（11）表示。

增益系数  $A_0$  允许减少跟踪控制中重要步骤的影响。

$$G_T(z) = A_0 \frac{K_I}{(z-1)} \quad (10)$$

$$\Delta = K_I \int \tilde{\zeta} \quad (11)$$

在这样的考虑下积分矩阵为：

$$K_I = \begin{bmatrix} K_{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{I_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{I_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

与可视化控制的工作[18]相似，由于在移动台的位置/方位的直接测量， $\Delta$  可以被解释为任务空间中的坐标增量。解决逆运动学问题  $\Gamma^{-1}$ ，就有可能得到  $Q_d$ 。

根据简化的控制方案，如图 12 所示，任务空间坐标可以由线性传感器的布置进行测量，因此传感器增益矩阵  $K_M$  可以表示为：

$$K_M = \begin{bmatrix} K_h & 0 & 0 \\ 0 & K_\theta & 0 \\ 0 & 0 & K_\varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

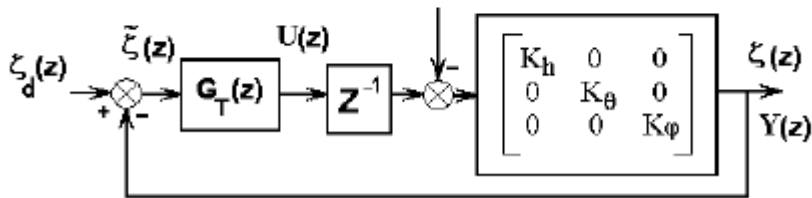


图 12. 简化的控制方案

闭环传递函数可写为：

$$\frac{0.06K_I K_M}{(z-1)z} [\zeta_d(z) - \zeta(z)] = Y(z) \quad (14)$$

变换和求解逆 Z，状态空间可表示为：

$$\begin{bmatrix} y_{(k+1)} \\ y_{(k+2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -0.06K_I K_M & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{(k)} \\ y_{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ 0.06K_I K_M \end{bmatrix} y_d(k) \quad (15)$$

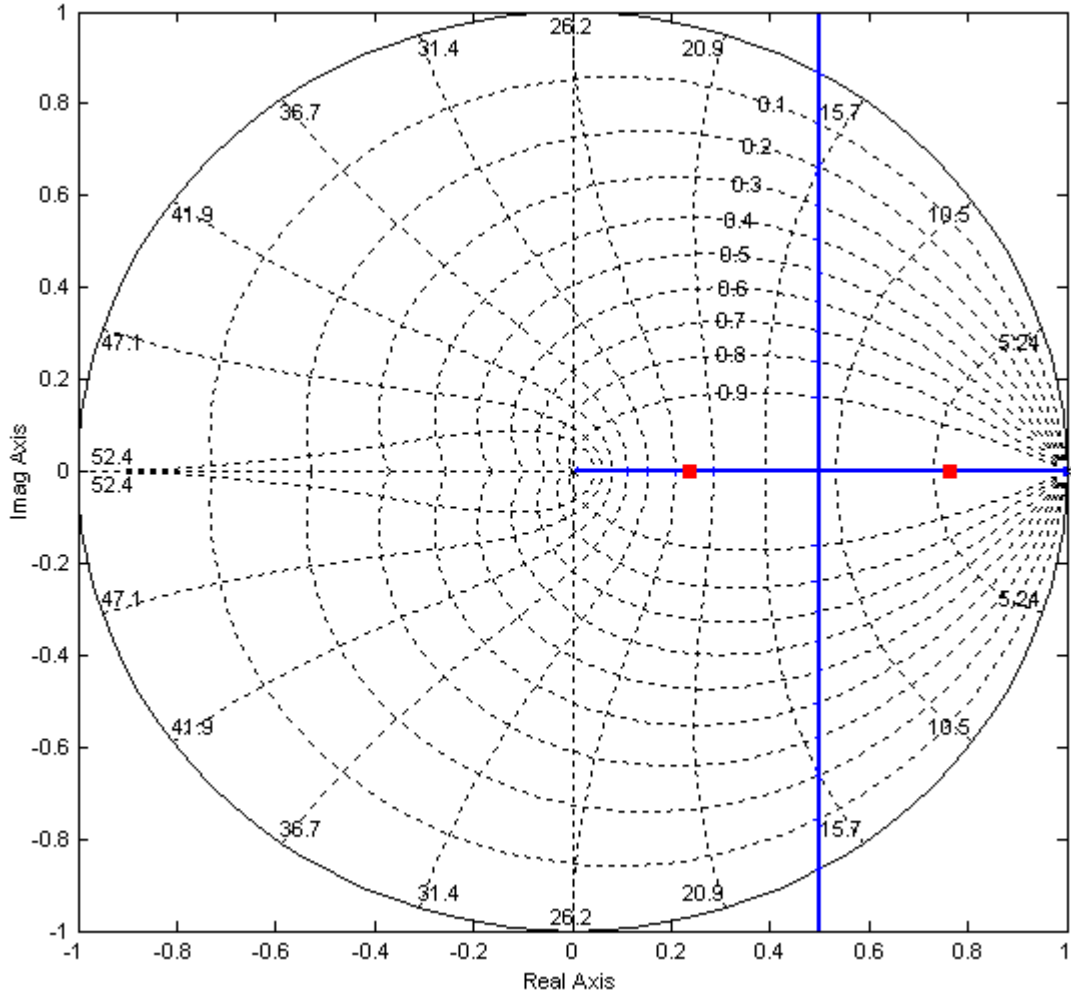


图 13. 高度控制回路控制器封闭极点增益  $K_{Ii}K_h = 3$  和 0.06 秒采样时间的根轨迹图

根据公式 (14)，高度控制系统的根轨迹如图 13 所示。在这种情况下，增益  $K_h K_{Ii} = 3$ ，闭环极点被选用了。这种设计应采用对阶跃输入的过阻尼瞬态响应。该系统稳定地使  $K_h K_{Ii} < 20$ 。对纵摇和横摇任务空间坐标也可以做类似的分析。

## 6. 实验结果

SIMPRO 公司在三自由度并联机器人中将上述控制方案作为运动模拟器使用。内环和外环的控制算法一直使用 MATLAB/ Simulink 中的 the Real Time Workshop Toolbox 和 Real Time Windows Target。所述末端执行器仰角仅由编码器测定，而横摇和纵摇角可以通过 IMU 或编码器来获得。一些实验中已经

在真实运动平台中开展了。起初，系统接收到在  $H_d$ ， $\theta_d$  和  $\phi_d$  的脉冲阶梯变化，内环的关节空间和外环的运动任务空间的笛卡尔控制方案测量出了任务空间输出。显而易见的，运动任务空间控制具有更好的性能，它的稳态误差消失了。瞬态响应类似于采用 Matlab/ Simulink-ADAMS 的模拟过程。

任务空间控制方案的运动跟踪输出（移动平台的侧倾和俯仰角），如图 14 和 15 中所示，分别通过使用编码器和惯性传感器展示。需要注意的是，从惯性测量单元所测量的信号是受高频噪声影响的。这种典型的惯性传感器的特征可以被巴特沃斯二阶滤波器设计以 10 弧度/秒的截止频率消除。

图 14 和 15 展示了运动任务空间控制方案中运动跟踪的良好性能，(15) 和 (16) 分别给出了以频率  $\omega=1$  弧度/秒的横摇和纵摇担任正弦参考信号。

$$\theta_{ref}(t) = \sin(0.3\omega t) - \sin(\omega t) - 10\sin(1.2\omega t) \quad (15)$$

$$\varphi_{ref}(t) = \sin(0.3\omega t) - \sin(\omega t) + 4\sin(1.2\omega t) \quad (16)$$

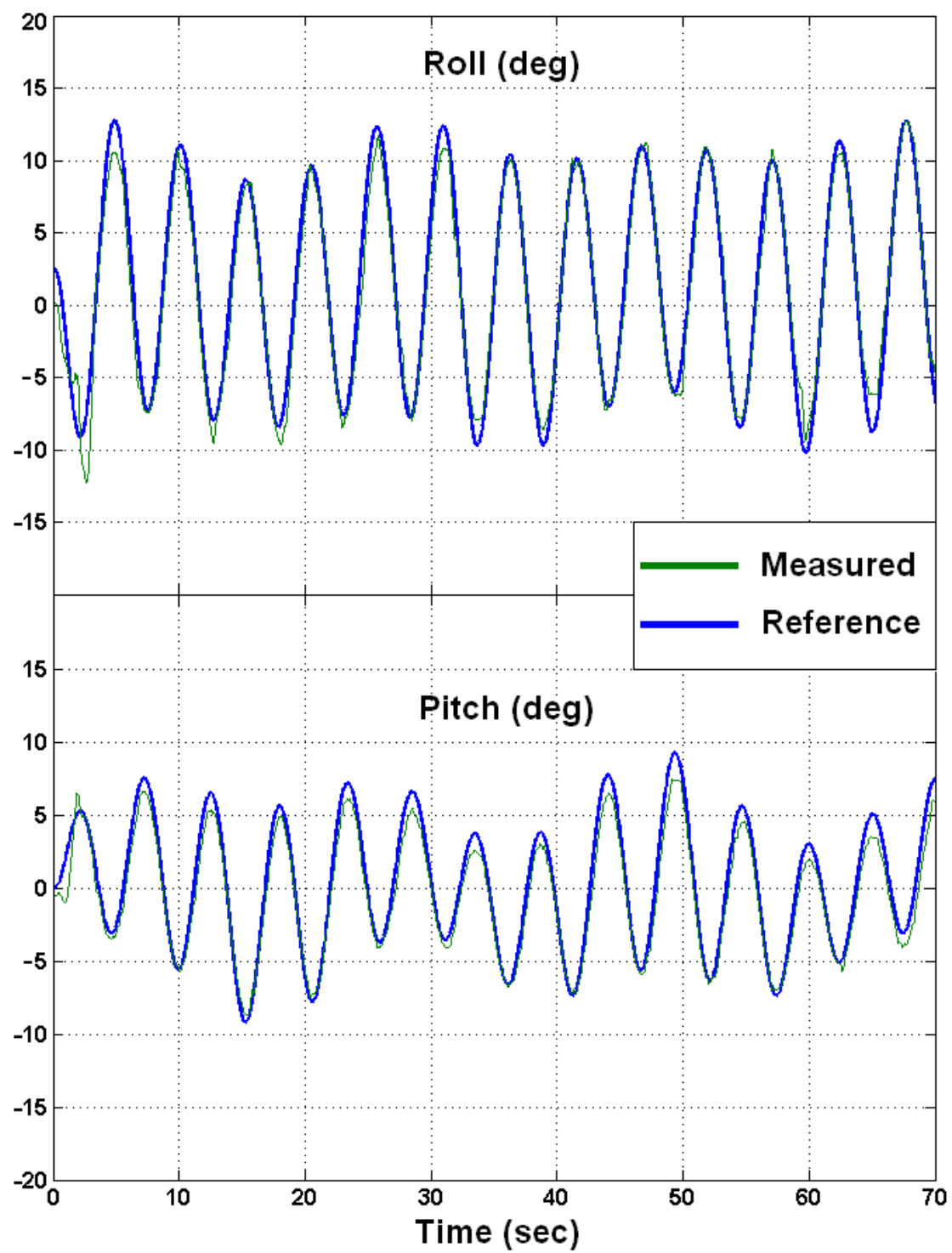


图 14. 横摇和纵摇方位角的移动平台的编码器测量的安排。

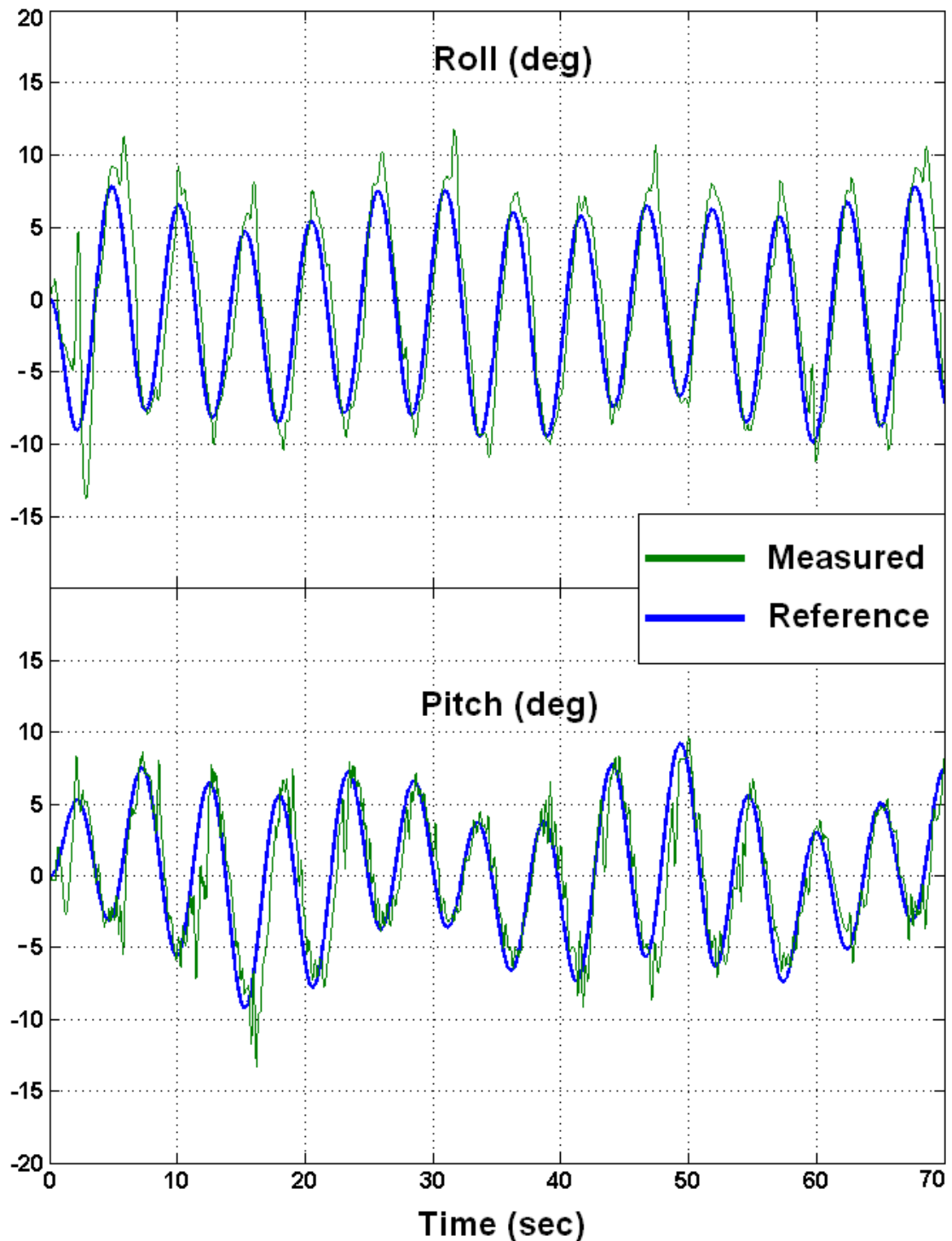


图 15. 动平台惯性传感器测量测量的横摇和纵摇角。

由于引入双控制方案，轨迹错误对机器人的结构动力效应的影响减小。其结果是，移动台的运动精度大大提高，这表明了所实施的控制系统的有效性。

## 7. 结论

本文通过对一个运动跟踪应用程序的研究，展示了将级联控制方案应用于 3 自由度电动气动驱动的运动平台的有效性。实验结果证明，控制机器人系统可以



以足够的精确度对应用程序进行轨迹跟踪。

内数字控制器通过零极点位置的设计满足了关节定位精度，而外部的任务空间控制的反馈循环使坐标错误最小化。因此级联结构在不确定性，动态的相互作用和建模误差的情况下显示出了更好的控制结果，大幅度提高了运动系统的跟踪精度。

双循环的体系结构通过改变外环控制，保持内环不变，为模拟和实现多种机器人控制策略提供了灵活性。另一方面，测量系统在控制频率范围内提供了可实现的动态位置和方向的精度，同时为SIMPRO三自由度气动并联机器人的末端执行器提供了测量解决方案。

控制算法在实施实时的工业应用中是相对简单和可行的，其中精确的跟踪控制和优良的稳定性都是能够实现的。后续的研究将着重于提高对有效载荷变化和噪声测量的控制策略。

## 8. 参考文献

- [1] J. P. Merlet, "Parallel Robots: Solid Mechanics and its Applications", 2nd ed., Springer, France, 2006, pp. 4 - 17.
- [2] H. Sadjadian and H. D. Taghirad, "Kinematic, Singularity and Stiffness Analysis of the Hydraulic Shoulder: A 3 - dof Redundant Parallel Machine". *Advanced Robotics*, vol. 20, no.7, pp. 763 - 781, 2006.
- [3] F. Wobbe, M. Kolbus, and W. Schumacher, "Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots", in *Automation and Robotics, In Tech Education and Publishing* (Ed.), Institute of Control Engineering, Germany, 2008, pp. 17 - 40.
- [4] J. Wang, et al, "Dynamic Feed - forward Control of a Parallel Kinematic Machine", *Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp. 313 - 324, April 2009.
- [5] Z. Yang, J. Wu, J. Mei, J. Gao and T. Huang, "Mechatronic Model Based Computed Torque Control of a Parallel Manipulator", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 123 - 128, 2008.
- [6] P. L. Yen, and C. C. Lai, "Dynamic Modeling and Control of a 3 - DOF Cartesian Parallel Manipulator", *Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 390 - 398, April 2009.
- [7] M. Callegari, M. C. Palpacelli, and M. Principi, "Dynamics Modelling and Control of the 3 - RCC Translational Platform", *Mechatronics*, vol. 16, no. 10, pp. 589 - 605, 2006.
- [8] F. Paccot, N. Andreff, and P. Martinet, "A Review on the Dynamic Control of Parallel Kinematics Machines: Theory and Experiments", *International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 3, pp. 395 - 416, 2009.
- [9] G. Gao and N. Yang, "Design and Implementation of Control System for a Novel Parallel Robot Mechanism", presented at the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control ICNSC08, Hainan, China, pp. 932 - 937, April 6 - 8, 2008.
- [10] A. Fanaei and M. Farrokhi, "Robust Adaptive Neuro - Fuzzy Controller for Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators in Contact with Unknown Environment", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 125 - 144, April 2006.
- [11] H. Hahn, "Mathematical Modeling, Control, and Computer Simulation and Laboratory Experiments of a Spatial Servopneumatic Parallel Robot", *Nonlinear Dynamics*, vol. 40, no. 1, pp. 387 - 417, 2005.
- [12] E. Izaguirre, L. Hernandez, E. Rubio, and P. J. Prieto, "Decoupled Control of 3 - DOF Pneumatic Platform used as Motion Simulator", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 8, no. 4, pp. 1 - 12, 2011.
- [13] E. Rubio, L. Hernandez, R. Aracil, and R. Saltaren, "Implementation of Decoupled Model - Based Controller in a 2 - DOF Pneumatic Platform used in Low - Cost Driving Simulators", presented at the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics

- Conference CERMA'09, Mexico, Sept. 22 - 25, 2009.
- [14] E. Rubio, L. Hernandez, R. Aracil, R. Saltaren, and R. Moreno, "Modelling, Identification and Control of Linear Electro - pneumatic Actuators. Application in two degree of freedom platform", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol.4, no.4, pp. 58 - 70, 2007.
- [15] J. Jun, K. Kanaoka, and S. Kawamura, "Cascaded Feedback Control Scheme for Trajectory Tracking of Robot Manipulator Systems with Actuator Dynamics", *Advanced Robotics*, vol.24, no.5 - 6, pp. 879 - 902, 2010.