

基于激光雷达的多关节机器人姿态 自动控制研究

莫毅¹, 卿启新²

(1. 广西工业职业技术学院 电子信息学院, 南宁 530001;

2. 广西科技大学 自动化学院, 广西 柳州 545006)

摘要: 为了避免机器人坡面行进姿态与平坦地形直行姿态出现较大偏差, 保证多关节机器人运动稳定性, 研究基于激光雷达的多关节机器人姿态自动控制方法; 结合激光雷达定位导航技术, 构建 CPG 单元振荡器模型, 根据运动步态生成原则优化处理足结构参数, 完成多关节机器人的运动姿态参数设定; 根据姿态参数设定结果实现运动坐标转换, 利用动力学方程的简化与分解表达式, 确定非线性耦合项参数化处理结果, 整合所得变量数据建立反馈控制器连接闭环, 利用反馈控制器连接闭环自动控制多关节机器人姿态; 对比实验结果表明, 在激光雷达技术作用下, 机器人上、下坡步长与平坦直行步长之间的误差最大值仅为 10%, 机器人行进过程中不会出现明显晃动情况, 多关节机器人运动稳定性较高。

关键词: 激光雷达; 多关节机器人; 姿态控制; CPG 振荡器; 运动步态; 反馈控制器

Research on Automatic Attitude Control of Multi-Joint Robot Based on Laser Radar

MO Yi¹, QING Qixin²

(1. Electronic Information College, Guangxi Industrial Vocational and Technical College, Nanning 530001, China;

2. Automation College, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to avoid the large deviation between robot traveling posture on slope and that on flat terrain, and ensure the stability of multi-joint robot motion, an automatic attitude control method of the multi-joint robot based on Laser radar is studied. Combined with the positioning and navigation technology of laser radar, the central processor group (CPG) unit oscillator model is constructed, and the foot structure parameters are optimized according to the motion gait generation principle, and the motion posture parameters of the multi-joint robot are set. According to the setting results of attitude parameters, the motion coordinate conversion is realized, and the nonlinear coupling term parameterization processing results are determined by using the simplification and decomposition expression of the dynamic equation. By using the feedback controller, the closed loop is established by integrating the obtained variable data, and the multi-joint robot attitude is automatically controlled by the feedback closed loop. The comparative experimental results show that under the action of Lidar technology, the maximum error of the steps between the up and down slope and the flat straight travel for the robot is only 10%, the robot will not appear obvious shaking in the process of traveling, and the motion stability of the multi-joint robot is high.

Keywords: laser radar; multi-joint robot; attitude control; CPG oscillator; motor gait; feedback controller

0 引言

激光雷达是一种特殊雷达系统, 能够借助激光束探测目标对象所处位置, 可以将速度、频率等特征量测量指标反馈回控制主机。与其他类型的雷达探测系统相比, 激光雷达设备可以根据探测激光束与目标回波之间的差异性, 获取与测量目标相关的参数信息。无论目标对象处于静态或动态运动态势, 控制主机都能对其进行准确地跟踪与识别^[1]。激光雷达探测系统由激光发射器、光学接收设备、信息处理平台等多个结构组成。激光发射器元件将输入电

脉冲信号转换成光脉冲信号发射出去, 光学接收设备再将所接收到的光脉冲信号还原成初始电脉冲信号, 以便于显示器设备可以完整表现出探测对象的存在状态^[2]。

多关节机器人也叫关节机器人或关节机械手臂, 其各个连接关节的运动形态都是转动的, 故而整体形态与人的手臂极为类似^[3]。当某个关节出现转动时, 其与核心连杆在空间方向上会产生一个相对移动量, 若相对移动量的取值相同, 则机器人关节的转动角度数值也相同, 由于机器人运动姿态会随着转动角数值的变化而发生改变, 所以一

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-09-13。

基金项目: 2018 年度广西职业教育教学改革研究项目(桂教职成[2018]35 号)。

作者简介: 莫毅(1981-), 男, 广西贵港人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事图像处理及机器视觉技术方向的研究。

引用格式: 莫毅, 卿启新. 基于激光雷达的多关节机器人姿态自动控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 143-148.

台多关节机器人需要由多台计算机设备进行控制。为了保持机器人运动行为的稳定性利用模型降阶与链式结构的机械臂位姿控制算法将整个控制过程划分为多个阶段, 根据被动连杆姿态角的变化幅度确定中间姿态角的当前转动数值, 再联合目标姿态角偏转程度的求解结果, 判断多关节机器人是否出现明显的运动晃动情况^[4]。然而此方法并不能有效控制机器人坡面行进步长与平坦地形直行运动步长之间的差值水平, 在维持机器人运动稳定性方面的能力不足以满足实际应用需求。

为解决上述问题, 设计基于激光雷达的多关节机器人姿态自动控制方法。

1 激光雷达定位导航技术

利用激光雷达实现多关节机器人姿态的定位与导航涉及如下两方面问题: 1) 如何掌握机器人在雷达地图中的具体位置; 2) 根据激光脉冲光束的传输情况, 制定合理的运动路线。激光雷达定位导航技术要求在指定运动空间内设置多个目标位置节点, 在每个节点上装配反射板结构^[5]。机器人在移动时, 激光雷达设备对反射板进行集中扫描, 导航主机自主选择并记录三个以上反射板所处位置, 再通过几何计算的方法对相关运动参数进行解析, 通常情况下的定位导航遵循“三角法”原则, 具体参考图 1。

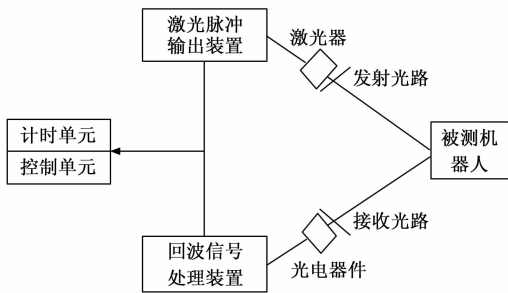


图 1 激光雷达定位导航原理

激光脉冲输出装置借助激光器元件将光波信号发射至被测机器人所处位置, 而回波信号处理装置则借助光电器件对电量信号进行聚合处理, 当回收信号强度达到既定数值标准之后, 计时单元、控制单元开始统计激光雷达传输回路中的信号输出与回收总量, 直至导航主机能够准确定位被测机器人的位姿形态^[6-7]。

设 α 表示多关节机器人姿态节点定义系数, E_a 表示运动向量, U_a 表示定位向量, \bar{R} 表示激光传输信号的单位累积量, \dot{q} 表示激光脉冲信号的输出强度, e 表示导向向量初始赋值, β 表示雷达测距信号的回传强度, 联立上述物理量, 可将激光雷达定位导航原理用下述公式定义为:

$$W_a = \sum_{i=1}^{+\infty} \dot{q} \cdot \frac{(|\bar{R}(E_a^i - U_a^i)|)}{\beta \times (\alpha - 1)} \quad (1)$$

由于电脉冲输出信号不可能被完全转换成光脉冲回波信号, 所以激光雷达传输回路中, 光波信号的利用效率不会等于 100%。

2 多关节机器人运动姿态

在激光雷达定位导航技术的支持下, 完善 CPG 单元振荡器模型, 再通过优化足结构参数的处理方式, 生成完整的机器人行进路线, 以此开展机器人运动姿态。

2.1 CPG 单元振荡器模型

CPG 单元振荡器为多关节机器人提供了运动过程中的动力支持。在机器人行进过程中, 关节设备的变化状态由弯曲、伸展两种形式组成, 故而 CPG 单元振荡器模型的运行状态也由包含两个部分。

2.1.1 关节设备弯曲

当机器人关节设备呈现弯曲状态时, 激光信号快速输入信号集成设备之中, 此时电量信号由振荡器回路“+”级传输至“-”级, 振荡设备中生成大量的雷达射线, 且这些射频信号的传输方向始终与电量信号的传输方向保持一致^[8]。

2.1.2 关节设备伸展

当机器人关节设备呈现伸展状态时, 已存储激光信号由集成设备继续向外传输, 此时电量信号传输方向虽然由振荡器回路“+”级指向“-”级。由于所有传输信号的波动能力都相对较弱, 故而振荡设备中的雷达射线不能继续向外传输, 只能借助振荡器模型底层的 CPG 单元回路反馈给机器人足结构, 从而使得机器人的运动步频与步长得到有效控制^[9]。

完整的 CPG 单元振荡器模型连接回路如图 2 所示。

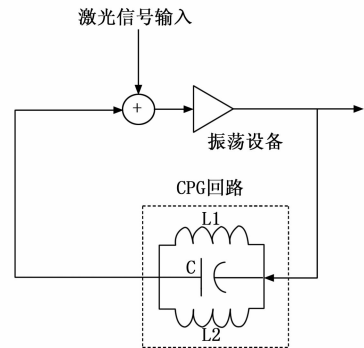


图 2 CPG 单元振荡器传输回路

CPG 单元振荡器模型表达式为:

$$R = \begin{cases} \frac{|\dot{I}|^2 - \delta \dot{I}'}{W_a}, & \dot{I} > \dot{I}' \\ (1 - \gamma^2) \cdot \frac{\chi \cdot W_a}{\dot{I}^2 + \dot{I}'^2}, & \dot{I} \leq \dot{I}' \end{cases} \quad (2)$$

式中, \dot{I} 表示关节弯曲行为特征, \dot{I}' 表示伸展行为特征, δ 表示激光信号集成系数, γ 表示电量信号集成系数, χ 表示时间常数。 $\dot{I} > \dot{I}'$ 时, CPG 单元振荡器控制机器人关节进行弯曲运动; $\dot{I} \leq \dot{I}'$ 时, CPG 单元振荡器控制机器人关节进行伸展运动。

2.2 足结构参数优化

多关节机器人的工作环境较为复杂, 故而利用激光雷

达设备实现对机器人运动姿态的自动控制, 此时要求机器人足结构具有较好的地形适应性与运动稳定性^[10]。由于 CPG 单元振荡器结构是一个串并联并存的混合应用设备, 所以当机器人足结构处于自由度较多的复杂运动环境中时, 要求关节设备必须满足最基本的足结构运动性能。在 CPG 单元振荡器模型的支持下, 以多关节机器人足结构作为研究对象, 并对足结构尺寸参数进行优化处理, 从而使得控制主机能够精准捕获处于同一运动平面内的机器人运动姿态节点^[11]。设 r_1, r_2, \dots, r_n 表示 n 个处于同一运动平面内的机器人关节姿态节点, $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 分别表示与 r_1, r_2, \dots, r_n 匹配的运动转向系数, U 表示复杂度标记特征, 联立上述物理量, 可将多关节机器人足结构运动参数求解表达式为:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{n} \left(\gamma_1 \cdot \frac{r_1}{U} + \gamma_2 \cdot \frac{r_2}{U} + \dots + \gamma_n \cdot \frac{r_n}{U} \right) \quad (3)$$

联立式 (2)、式 (3), 可将足结构参数优化结果表示为:

$$O = (u_{\max}^2 - u_{\min}^2) \frac{R \cdot \varepsilon_n}{|\Delta T|} \quad (4)$$

其中: u_{\max} 表示激光波振荡系数的最大取值, u_{\min} 表示激光振荡系数的最小取值, ΔT 表示单位运动周期。为避免复杂数据处理环节的出现, 在划分单位运动周期时, 要求机器人足结构运动形态应保持一致。

2.3 运动步态生成

步态是对于运动模式的描述, 指的是机器人关节设备在其运动过程始中始终遵循固定的顺序和时序。步态周期是生成完整运动步态路线的关键指标, 可以理解为机器人完成一次运动行为所经历的时长, 一般来说, 步态周期越长, 就表示机器人的运动步幅越大, 此情况下关节设备的移位情况也就越大; 反之, 若步态周期相对较短, 则表示机器人的运动步幅较小, 此情况下, 关节设备也就不会表现出较为明显的移位情况^[12-13]。摆动相是指在独立步态周期内, 机器人足结构相对于机体存在位置而出现的趋向性运动程度, 可以直接影响机器人运动姿态的变化情况。在步态周期为 \tilde{t} 、摆动相为 φ 的情况下, 可将多关节机器人运动步态路线表达式定义为:

$$\rho = \lambda \cdot \left[(i_t - i_0) - \sqrt{\varphi \frac{O}{\tilde{t}}} \right] \quad (5)$$

式中, i 表示目标姿态节点标记系数, i_t 表示目标位置处的机器人关节坐标, i_0 表示机器人关节的初始坐标, λ 表示独立步态周期内的机器人运动强度。在激光器、光电元件所处位置保持不变的情况下, 激光雷达信号传输路径也不会发生改变, 这也是机器人运动步态路线内不会出现反向分布的姿态节点的主要原因。

3 机器人姿态自动控制实现

根据已生成的机器人运动步态行进路线, 设定姿态参数指标, 通过转换运动坐标的方式, 求解动力学方程表达式, 从而完善反馈控制器连接形式, 实现基于激光雷达的多关节机器人姿态自动控制。

3.1 姿态参数设定

姿态参数设定表达式影响机器人运动姿态节点的分布形式, 由于反馈控制器元件可以直接接收激光雷达设备输出的光波信号, 所以当姿态节点完全存在于同一条光波信号回路内时, 检测主机对于机器人姿态节点的控制能力最强^[14-15]。设 \vec{S} 表示激光雷达光波信号传输向量, \vec{S} 表示电量回传信号传输向量, f 表示激光雷达光波信号的方向性传输特征, κ 表示方向度量系数, 联立上述物理量, 可将多关节机器人运动姿态的方向向量表示为:

$$\vec{A} = \rho \left(\frac{1}{\vec{S}^2} - \frac{\vec{S}}{\kappa f} \right) \quad (6)$$

在式 (6) 的基础上, 假设 g_x 表示机器人运动姿态在 X 轴方向上的数值分量, g_y 表示 Y 轴方向上的数值分量, g_z 表示 Z 轴方向上的数值分量, 且 $g_x \neq 0, g_y \neq 0, g_z \neq 0$ 的不等式条件同时成立, μ 表示关节角标记系数。

多关节机器人的姿态参数设定表达式为:

$$D = \frac{1}{\mu} \int_{d=1}^{+\infty} d\vec{A} (g_x \cdot g_y \cdot g_z) \quad (7)$$

由于机器人运动步态路线是完整的行进回路, 所以选择关节角标记系数时, 要求实时转向角数值应处于 $(0, \pi)$ 的区间, 当转向角数值等于 $\frac{\pi}{2}$ 时, 则表示当前运动状态下, 机器人运动姿态在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向上的数值分量完全相等。

3.2 运动坐标转换

对于多关节机器人运动行为而言, 运动坐标转换处理应从 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向上同时进行, 但由于激光雷达设备所输出光波信号只能保持平面传输状态, 所以在对姿态节点进行控制时, 要根据节点坐标所处位置, 更改光波信号的入射与回传方向^[16]。设 $\nu_1(x_1, y_1, z_1), \nu_2(x_2, y_2, z_2)$ 是位于同一运动平面内两个不重合的机器人姿态节点, \vec{X} 表示从节点 ν_1 指向节点 ν_2 的 X 轴法向量, \vec{Y} 表示从节点 ν_1 指向节点 ν_2 的 Y 轴法向量, \vec{Z} 表示从节点 ν_1 指向节点 ν_2 的 Z 轴法向量, 在上述物理量的支持下, 联立式 (7), 可将基于激光雷达的多关节机器人运动坐标转换表达式定义为:

$$\begin{cases} h_x = D \frac{|x_2 - x_1|}{\vec{X}} \\ h_y = D \frac{|y_2 - y_1|}{\vec{Y}} \\ h_z = D \frac{|z_2 - z_1|}{\vec{Z}} \end{cases} \quad (8)$$

当待处理姿态节点不处于同一运动平面内时, 需要根据平面转向角取值, 建立两个关联平面之间的映射关系, 将原节点在另一运动平面内的对应映射节点标记出来。按照姿态参数设定原则, 判断当前节点之间的映射关系是否能够满足激光雷达光波的稳定传输需求。在此基础上进行运动坐标转换处理, 直至所得结果能够清晰反映出机器人关节姿态节点的排列形式^[17]。

3.3 动力学方程

机器人关节姿态动力学方程构建包括简化与分解、非线性耦合项参数化处理两个部分，本章节研究将针对上述内容展开。

3.3.1 简化与分解

简化是指化解所选姿态节点坐标表达式，而分解则是指将完整坐标表达式整合成 X 轴、Y 轴、Z 轴三个独立结构，根据三者之间的映射关系，判断当前情况下所求得数学公式能否准确描述出机器人姿态节点之间的分布状态关系^[18-19]。假设 \tilde{x} 表示激光雷达光波在 X 轴方向上的投影长度， \tilde{y} 表示 Y 轴方向上的投影长度， \tilde{z} 表示 Z 轴方向上的投影长度， $\boldsymbol{\vartheta}_x$ 表示与 \tilde{x} 匹配的运动步态分向量， $\boldsymbol{\vartheta}_y$ 表示与 \tilde{y} 匹配的运动步态分向量， $\boldsymbol{\vartheta}_z$ 表示与 \tilde{z} 匹配的运动步态分向量，求解多关节机器人姿态动力学方程时， $\tilde{x} > 0, \tilde{y} > 0, \tilde{z} > 0$ 的不等式条件同时成立。在上述物理量的支持下，联立式(8)，可将动力学方程简化与分解表达式定义为：

$$\dot{k} = \frac{\boldsymbol{\vartheta}_x \boldsymbol{\vartheta}_y \boldsymbol{\vartheta}_z}{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2} (\tilde{x} + \tilde{y} + \tilde{z}) \quad (9)$$

由于激光雷达光波在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上的投影长度不一定完全相同，所以当定义姿态坐标侧重方向不同时，所得动力学方程的简化与分解处理结果也会有所不同。

3.3.2 非线性耦合项参数化

非线性耦合项参数化注重对机器人运动姿态的方向转角进行度量，可以在动力学方程简化与分解表达式的基础上，限定位姿角的偏转情况，从而使得处理主机能够对偏转角参量进行更为细致的划分，也可有效抑制激光雷达光波变化^[20-21]。设 $\boldsymbol{\theta}_x$ 表示机器人运动方向角的 X 轴转向分量， $\boldsymbol{\theta}_y$ 表示 Y 轴转向分量， $\boldsymbol{\theta}_z$ 标准 Z 轴转向分量， ΔL 表示机器人关节姿态的单位位移量，联立上述物理量，可将动力学方程非线性耦合项参数化处理结果表示为：

$$J = \frac{\dot{k} [\cos(\boldsymbol{\theta}_x) + \cos(\boldsymbol{\theta}_y) + \cos(\boldsymbol{\theta}_z)]}{(\tilde{\omega}_x + \tilde{\omega}_y + \tilde{\omega}_z) \cdot \Delta L} \quad (10)$$

其中： $\tilde{\omega}_x$ 表示 X 轴方向上的运动步长值， $\tilde{\omega}_y$ 表示 Y 轴方向上的运动步长值， $\tilde{\omega}_z$ 表示 Z 轴方向上的运动步长值。在机器人运动过程中，若关节姿态节点不存在跨越激光雷达光波传输平面的动力学行为，则非线性耦合项参数化处理结果不会出现变化。

3.4 反馈控制器

反馈控制器是一个完整的信号闭环结构，可以根据动力学方程表达式，标记机器人关节所处实时运动位置，将已记录节点与激光雷达光波的人射节点进行对比，以确定步长值向量的实际取值结果^[22-23]。由于动力学方程非线性耦合项参数化结果并不能直接影响激光雷达光波的传输行为，所以建立反馈控制器闭环时，默认激光雷达光波的传输方向只在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上存在波长分量。设 m_1, m_2, \dots, m_n 表示 n 个不相等的运动步幅向量， v 表示关节角运动速度， b 表示位姿角定义系数， ζ 表示关节角偏转向量， σ 表示位姿角偏转向量，联立式(10)，可将基于激光雷达的

多关节机器人姿态反馈控制器闭环表达式定义为：

$$C = (|m_1| \cdot |m_2| \cdot \dots \cdot |m_n|) \cdot \frac{\zeta |v|^2 + \sigma |b|^2}{J} \quad (11)$$

多关节机器人姿态反馈控制器闭环设计过程中，除了要考虑激光雷达输出光波的定位能力外，还要确保反馈控制器结构呈现出完整的闭环连接状态，以此实现对于多关节机器人姿态自动控制。

4 实验结果与分析

4.1 实验准备

选择 R6-0205 型号的多关节机器人作为实验对象，如图 3 所示。

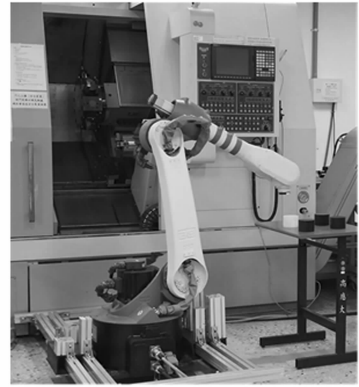


图 3 多关节机器人实验设备

将其置于 5.0~34.0 V 的电压环境中，调节陀螺仪测量设备，使得 MTi-G-700 姿态传感器对于机器人关节角节点的控制精度保持为 1。

表 1 记录了相关技术指标的实际取值范围。

表 1 技术参数表

编号	技术指标	范围值
1	速度精度/(m/s)	0.1
2	输入电压/V	5.0~34.0
3	水平位置精度/m	1
4	垂直位置精度/m	1
5	空间位置精度/m	1
6	陀螺测量范围/(°/s)	450

实验组为基于激光雷达的多关节机器人姿态自动控制算法方法，对照组为基于模型降阶与链式结构的机械臂位姿控制方法，分别利用上述方法监测多关节机器人的坡面行进姿态，再将所得步长值数据与机器人平坦直行步长进行对比。机器人运动行为的激光雷达图像如图 4 所示。

监测机器人坡面行进姿态时，为避免关节角出现过度偏转的情况，应控制机器人运动速率保持较为稳定的数值状态。

4.2 数据处理与结果分析

机器人坡面步长与平坦直行步长之间的差值可以用来

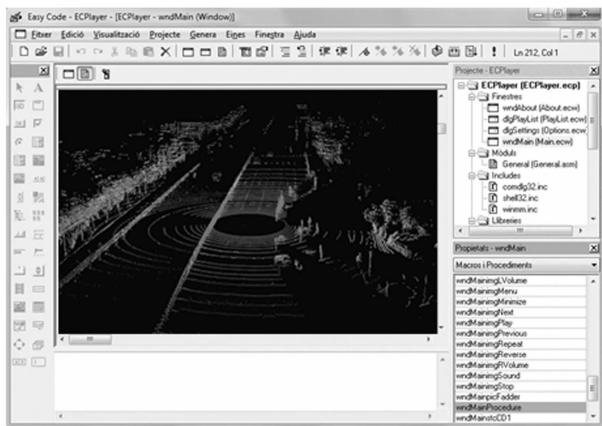


图 4 机器人运动行为的激光雷达图像

描述机器人运动行为的稳定性。一般来说, 步长差值越小, 就表示机器人的运动行为越稳定。对于多关节机器人设备来说, 当其关节偏转角达到 90° 时, 整个机械臂呈现水平状态, 此情况下激光雷达的传输光波容易被主臂体结构遮挡, 故而本次实验过程中, 只记录关节角处于 $15\sim 75^\circ$ 时, 机器人坡面步长的数值变化情况。

图 5 反映了机器人上、下坡步长与平坦直行步长的数值对比情况。

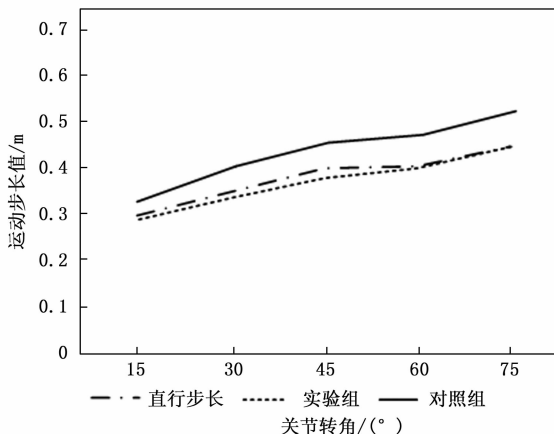


图 5 机器人上坡步长

分析图 5 可知, 随着关节转角数值的增大, 机器人平坦直行步长呈现出不断增大的数值变化状态。当关节转角等于 75° 时, 实验组上坡步长与当前情况下的平坦直行步长完全相等, 二者之差为 0; 当关节转角等于 45° 时, 实验组上坡步长与当前情况下的平坦直行步长差值最大, 达到了 0.02 m , 即实验组上坡步长与平坦直行步长之间的数值最大误差为 5% 。当关节转角等于 75° 时, 对照组上坡步长与当前情况下的平坦直行步长差值最大, 达到了 0.07 m , 即对照组上坡步长与平坦直行步长之间的数值最大误差为 15.6% , 高于实验组误差水平。

分析图 6 可知, 当关节转角等于 15° 、 30° 、 45° 、 75° 时, 实验组下坡步长与当前情况下的平坦直行步长完全相等,

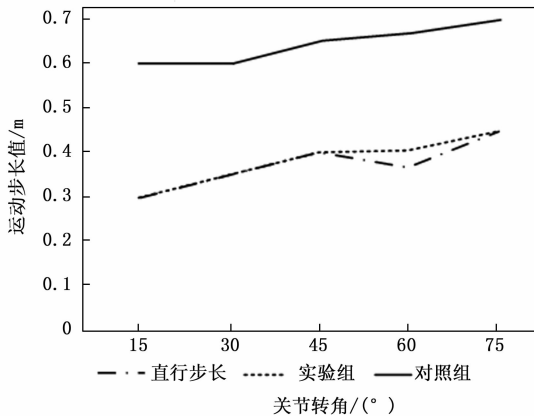


图 6 机器人下坡步长

二者之差为 0; 当关节转角等于 60° 时, 实验组下坡步长与当前情况下的平坦直行步长差值最大, 达到了 0.03 m , 即实验组下坡步长与平坦直行步长之间的数值最大误差为 7.3% 。当关节转角等于 60° 时, 对照组下坡步长与当前情况下的平坦直行步长差值最大, 达到了 0.26 m , 即对照组下坡步长与平坦直行步长之间的数值最大误差为 61.9% , 远高于实验组误差水平。

整个实验过程中, 实验组机器人步长的数值状态明显更加稳定, 这就表示在该控制算法作用下, 机器人不会出现明显的晃动情况。

综上所述, 本次实验结论如下:

1) 基于模型降阶与链式结构的机械臂位姿控制方法在坡面运动状态下, 不能有效控制实际步长与平坦直行步长之间的差值, 不满足维持机器人稳定运动行为的实际应用需求;

2) 基于激光雷达的多关节机器人姿态自动控制方法能够较好控制上、下坡步长与平坦直行步长之间的差值水平, 对于维持机器人稳定运动行为能够起到明显的促进作用。

5 结束语

本文在激光雷达定位导航技术的基础上, 建立 CPG 单元振荡器模型, 又根据运动步态路线表达式, 求解动力学方程, 再按照运动坐标转换原则, 调节反馈控制器闭环的连接状态。与基于模型降阶与链式结构的机械臂位姿控制方法相比, 本文所设计的方法能够避免机器人坡面行进姿态与平坦地形直行姿态出现较大偏差, 更符合维持机器人稳定运动行为的实际应用需求。此外, 这种新型控制算法还能够准确辨别出机器人的上坡与下坡运动行为, 并对其分别控制, 这也是机器人在整个运动过程中不出现明显晃动行为的原因。

参考文献:

[1] 赵传, 郭海涛, 王优扬, 等. 利用邻域方向分布的机载激光雷达点云建筑物外轮廓提取 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (2): 374-387.
 [2] 方付平, 胡恒, 鄢朋朋, 等. 基于光学锁相环的编码合成孔

- 径激光雷达系统设计与实验验证 [J]. 光学学报, 2022, 42 (6): 136-143.
- [3] 雷荣华, 陈力. 姿态受控柔性臂空间机器人的自适应神经网络容错控制及残振抑制 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (7): 156-162.
- [4] 刘东, 万雄波, 王亚午, 等. 基于模型降阶与链式结构的平面欠驱动机械臂位姿控制 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50 (5): 718-733.
- [5] 郭明, 周玉泉, 陈才, 等. 北斗导航授时的移动激光雷达测量系统时间同步装置设计 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (S2): 33-42.
- [6] 栾佳宁, 张伟, 孙伟, 等. 基于二维码视觉与激光雷达融合的高精度定位算法 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (5): 1484-1491.
- [7] 林晨浩, 彭育辉. 一种融合视觉与 IMU 的车载激光雷达建图与定位方法 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (1): 82-88.
- [8] 齐晓斐, 于杰, 孙旭涛, 等. 低调谐增益变化的 10 GHz 电感电容式压控振荡器设计 [J]. 国防科技大学学报, 2021, 43 (2): 54-60.
- [9] 蒋行舟, 张国琴, 闫树斌, 等. 一种高性能带有幅度测量的 CMOS 电压控制振荡器的设计 [J]. 电子器件, 2021, 44 (4): 812-816.
- [10] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 机器人加工几何误差建模研究: II 参数辨识与位姿优化 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (7): 169-184.
- [11] 徐化娟, 李宏伟, 张春燕. 一种新型 3T1R 并联机器人机构运动学分析与参数优化 [J]. 机械传动, 2021, 45 (5): 57-65.
- [12] 张金艺, 秦政, 林羽晨, 等. 面向伴随型机器人同步运动的递进式步态时相检测算法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (1): 113-120.
- [13] 周智雍, 钱伟, 丁加涛, 等. 基于核化运动基元的外骨骼膝关关节步态轨迹在线规划 [J]. 机器人, 2021, 43 (5): 557-566.
- [14] 赵迪, 孙冲, 袁建平, 等. 基于多航天器协同观测的空间非合作目标姿态参数在轨识别方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2021, 39 (2): 267-277.
- [15] 卢帅龙, 宋振鲁, 杨富富. 3-R (US&SPU) 可折叠并联机构的定姿态工作空间及其参数优化 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37 (4): 62-67, 74.
- [16] 张媛, 王士敏, 王琪. 对定点运动刚体欧拉角的独立性及其坐标变换矩阵的分析 [J]. 力学与实践, 2022, 44 (2): 385-389.
- [17] 符桂铭, 郭文静, 耿涛, 等. 基于双目视觉和距离误差模型的工业机器人运动学参数标定方法 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (15): 10-16, 43.
- [18] 吉磊, 钱林方, 陈光宋, 等. 基于 Bathe 积分算法的机械系统多体动力学方程求解方法 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54 (11): 1218-1226.
- [19] 张哲, 代洪华, 冯浩阳, 等. 初值约束与两点边值约束轨道动力学方程的快速数值计算方法 [J]. 力学学报, 2022, 54 (2): 503-516.
- [20] 李振辉, 许丽萍. 一类具有线性和非线性耦合项的 Kirchhoff 型方程组的基态解 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2022, 47 (4): 37-44.
- [21] 杜明俊, 侯勇俊, 吴毅, 等. 非线性耦合同向回转的双偏心转子振动系统同步行为研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (23): 150-164.
- [22] 仲训呆, 仲训昱, 彭侠夫, 等. 未知雅可比建模的机器人视觉伺服自抗扰控制方法 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2022, 61 (2): 231-238.
- [23] 李丽, 卢延荣, 于晓. 参数不确定离散时间系统的有限时间输出反馈预见控制器设计 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (9): 2074-2084.
- ***
(上接第 136 页)
- [8] 柳阳明, 王军. 某机全机液压系统多功能实验平台的开发 [J]. 液压与气动, 2015 (2): 123-126.
- [9] 牛慧峰, 佟祥伟, 雷亚飞, 等. 智轨列车电液伺服转向系统动态特性实验实验台与测控系统开发 [J]. 液压与气动, 2019 (7): 120-127.
- [10] 张涛, 何晓晖, 王强, 等. 轮边驱动液压混合动力车辆能量回收系统性能研究 [J]. 液压与气动, 2019 (10): 90-96.
- [11] 黎邦腾, 梁薇, 马平. 基于 Qt 平台的 OPC 服务器的开发及仿真应用 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 154-158.
- [12] 郭庆军. 基于 Automation Studio 铲运机液压油泵各工况特性分析 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (14): 102-109.
- [13] 廖哲, 马飞. 基于 Automation Studio 的螺杆桩机立柱升降仿真及实验验证 [J]. 机床与液压, 2017, 45 (20): 83-86.
- [14] 郭建华. 新的液压系统仿真方法 [J]. 煤矿机械, 2017, 38 (5): 162-163.
- [15] 刘义付, 孙瑞霞. 基于 Automation Studio 工程车辆铲斗举升机构特性分析 [J]. 机械设计与制造, 2021 (7): 32-36.
- [16] 王亚男. 基于 Automation Studio 的塔式起重机的建模与仿真 [J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57 (7): 52-54.
- [17] 彭先敏, 章贵川, 车兵辉, 等. 动力系统的智能化监测与安全保护设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 43-47.
- [18] 李丽萍, 闫金星. 基于多轴联动的航天器带动力风洞实验控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 123-127.
- [19] 胡彩霞, 刘璐, 宋伟伟. 基于 PLC 的货物定位控制系统设计 [J]. 电子实验, 2020 (11): 37-39.
- [20] 杨慧远, 焦志刚. 基于西门子 S7-300 的步进电机定位控制系统设计 [J]. 机械工程与自动化, 2015 (6): 143-144.