

基于视觉标志间相对位姿的可变形臂标定方法

郝洁^{1,2} 李高峰^{1,2} 孙雷^{1,2} 卢翔^{1,2} 张森^{1,2} 刘景泰^{1,2}

摘要 针对家庭服务机器人工作的非结构化环境, 本文设计了一种可以根据任务需求相应地调整连杆形状的可变形操作臂. 该操作臂工作空间易于拓展、灵活度较高且成本低廉. 但连杆形状的改变给操作臂的建模和控制带来了困难. 首先, 可变形臂的运动学参数发生了巨大且无规律的变化, 使得固结在操作臂连杆上的关节坐标系可能脱离操作臂本体, 变得不可测量. 其次, 为适应不同任务需求, 可变形臂的连杆形状需要经常改变, 而传统标定方法往往追求更高的标定精度而非标定效率. 最后, 可变形臂的标定方法必须低成本且易于在家庭环境中实施, 而基于激光等传感器的标定方法设备价格昂贵, 对实验环境要求严格, 不便于在家庭中实施. 因此, 一种廉价、快速、易于实施的标定方法是可变形臂应用的基础. 本文分别基于 Denavit-Hartenberg (DH) 模型和旋量模型提出了基于视觉标志块间相对位姿测量的标定算法, 该算法在标志块处建立虚拟关节, 通过测量不同标志块间的相对位姿可快速、高效地获取可变形臂的运动学参数. 实验说明了两种标定方法的有效性, 同时还表明旋量模型更适合可变形臂的建模. 最后, 本文给出了利用可变形臂进行点触任务操作的实例, 展示出可变形操作臂在家庭使用中的优势.

关键词 可变形操作臂, 运动学, Denavit-Hartenberg 表示法, 旋量, 操作臂标定

引用格式 郝洁, 李高峰, 孙雷, 卢翔, 张森, 刘景泰. 基于视觉标志间相对位姿的可变形臂标定方法. 自动化学报, 2018, 44(8): 1413–1424

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160693

Relative-pose-of-markers Based Calibration Method for a Deformable Manipulator

HAO Jie^{1,2} LI Gao-Feng^{1,2} SUN Lei^{1,2} LU Xiang^{1,2} ZHANG Sen^{1,2} LIU Jing-Tai^{1,2}

Abstract The deformable manipulator can obtain relatively dexterous end-effector and extended workspace with fewer joints by bending its deformable links. However, frequent changes in links's shape may bring difficulties to the model and control of the manipulator. The reasons are as follows. First, the kinematic parameters experience drastic changes and become totally unknown. It is hard to measure the parameters directly. Second, the change is frequent. Thus a low-cost, less time consuming calibration method is the fundament of deformable manipulator for home service robots. In this paper, two calibration methods based on relative pose measurement of visual markers are developed for the Denavit-Hartenberg (DH) model and screw theory model, respectively. By introducing a virtual joint at the marker, the method can calculate the kinematic parameters quickly according to the relative pose of visual markers. Experimental results verify the effectiveness of the methods. It is shown that the screw model is more suitable for the deformable manipulator. Finally, two point touching tasks are conducted to demonstrate the advantage of the deformable manipulator.

Key words Deformable manipulator, kinematics, Denavit-Hartenberg (DH), screw theory, calibration

Citation Hao Jie, Li Gao-Feng, Sun Lei, Lu Xiang, Zhang Sen, Liu Jing-Tai. Relative-pose-of-markers based calibration method for a deformable manipulator. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(8): 1413–1424

家庭服务机器人工作在非结构化的环境中, 需

要面临多种任务作业. 因此, 一种廉价、灵巧、能面向多种作业任务、具有本质安全的操作臂对服务机器人进入家庭是非常重要的.

已有大量的工作将刚性臂应用于家庭服务或医疗护理^[1–3], 但传统刚性臂为满足面向多任务的需求, 往往通过增加手臂的自由度来增加手臂的灵巧度. 然而, 更高的自由度意味着更大的机械臂自重、更复杂的机械设计与控制策略和更高的成本. 另一种可行的方案是连续操作臂 (Continuum manipulator). 例如意大利理工大学高级机器人学实验室制造的章鱼机器人手 (Soft robotic octopus arm)^[4–5], 可以如章鱼手臂一样伸长、收缩和弯曲, 章鱼机器人手由横向驱动器、外部编织结构和人造皮

收稿日期 2016-09-28 录用日期 2017-05-26
Manuscript received September 28, 2016; accepted May 26, 2017

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA041403), 国家自然科学基金 (61375087, 61105096), 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (15JCZDJC31200, 14ZCD2GX00798) 资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA041403), National Natural Science Foundation of China (61375087, 61105096), and Natural Science Foundation of Tianjin (15JCZDJC31200, 14ZCDZGX00798)

本文责任编辑 侯增广
Recommended by Associate Editor HOU Zeng-Guang

1. 南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300350 2. 天津市智能机器人技术重点实验室 天津 300350

1. Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300350 2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Tianjin 300350

肤组成^[6-7]. 德国 Festo 公司研制的 RobotinoXT 操作臂^[8-10], 仿生了大象的鼻子, 可以向各个方向弯曲、伸长, 灵活度高, 操作臂采用内部气动驱动, 外部舵机牵引, 结构较复杂. 美国范德堡大学医疗电子实验室研制的 Active cannulas^[11-14], 由若干直径不同的钛镍合金套管组成, 可以实现伸长、收缩及弯曲. 中国科学院沈阳自动化研究所研制的水陆两栖蛇形机器人^[15-17], 具有多个关节, 可以在陆地和水中如蛇一样蜿蜒前进. 以及其他形式的柔性操作臂^[18-21] 等. 连续操作臂拥有良好的弯曲性能, 灵活性高, 但多采用绳索牵引、气动关节或记忆合金等方式实现柔性, 特殊的材料和驱动装置使得连续操作臂结构复杂且成本相对较高, 难以应用在家庭服务环境中.

本文设计并实现了一种可以根据任务需求相应地调整连杆形状的可变形操作臂, 其工作空间易于拓展、灵活度较高且成本廉价; 同时, 可变形臂由于其可被动改变形状的特性, 具有本质的安全. 该操作臂由刚性关节和可变形连杆组成, 当施加在可变形连杆上的外力大于可使连杆变形的阈值时, 连杆能够根据任务需求在外力的作用下被动改变形状; 而当施加的外力小于该阈值时, 可变形连杆能保持当前的形状不发生形变, 这时的可变形连杆可被视为刚体.

但由于连杆形状的改变, 操作臂的模型参数发生了剧烈的变化, 变得完全未知, 给操作臂的建模和控制带来困难. 传统操作臂的标定问题是机器人领域的一个基本问题, 已有大量相关研究工作, 按使用的传感器种类分为利用激光传感器^[22-25] 和利用视觉传感器^[26-29] 等方法或多种传感器的融合^[24-25, 30-31]. 本文提出的标定方法是基于低成本的视觉传感器的方法. 从操作臂的运动学模型出发, 标定方法可分为基于 Denavit-Hartenberg 参数模型 (DH 模型) 的标定方法^[22-25, 30-33] 和基于旋量模型的标定方法^[29, 34-38], 本文针对两种模型提出了相应的标定方法, 对比了两种模型应用在可变形臂中的优劣, 按模型参数的标称值是否已知, 分为基于标称值的校准方法^[22-25, 31-35] 和参数未知的绝对标定方法^[29-30, 39-40]. 本文中可变形臂的运动学模型在每次连杆形状改变之后均发生了较大的变化而变得完全未知, 因此属于参数未知的绝对标定方法.

尽管传统标定方法已经有了大量坚实的工作, 但可变形操作臂的标定问题具有其特殊性, 仍有其研究价值. 1) 在连杆形状改变后, 可变形臂的参数发生巨大且无规律的变化. 由于参数变化巨大, 基于标称值的校准^[22-25, 31-35] 的一类方法不适用于可变形臂的标定. 同时, 由于变化无规律, 使得固结在操作臂连杆上的关节坐标系可能沿着关节轴线方向平

移到空间中, 脱离操作臂本体, 使得该坐标系不可测量. 而传统方法未考虑这一情况^[30, 39-40]. 2) 为适应不同任务需求, 可变形臂的连杆形状需要经常改变, 这是可变形臂的本质属性. 因此, 可变形臂的标定方法要求更加快速高效. 而传统操作臂的模型参数在一次标定后可重复使用, 传统的标定方法也往往采用昂贵的设备或复杂的流程^[34, 39-40], 以追求更高的标定精度而非标定效率. 因此, 这些方法并不适用于可变形臂的标定. 3) 可变形臂的工作环境是家庭服务环境, 因此, 针对可变形操作臂的标定方法必须低成本且易于在家庭环境中实施. 而基于激光传感器^[23-25, 30-31] 等的标定方法虽能取得较高的标定精度, 但设备价格昂贵, 对实验环境的要求较为严格, 不便于在家庭环境中实施.

本文的主要贡献总结为: 1) 本文对可变形臂的运动学进行了分析, 阐述了可变形连杆的引入对操作臂运动学参数的影响, 分析了连杆的变形引起的参数变化量, 为可变形臂的标定算法提供了理论指导. 2) 本文分别基于 DH 模型和旋量模型提出了基于视觉标志间相对位姿测量的标定算法. 该算法通过在标志块处建立虚拟关节, 可快速高效地获取可变形臂的运动学参数, 且对摄像机的安装位置要求不严格, 易于在家庭环境中实施. 3) 本文也对标志块的张贴位置和张贴数量给出了建设性意见. 为了阐述方便, 本文所述标定方法只针对一个四自由度的可变形臂进行介绍, 但可以很容易通过更改标志块的位置而应用到一类串联可变形臂的标定问题中.

1 可变形操作臂的运动学分析

本节分别基于 DH 模型和旋量模型分析连杆形状的改变对可变形臂运动学参数的影响. 为阐述方便, 本文记连杆变形前的臂形为第 $k-1$ 个臂形, 相应参数变量以右上角标 $k-1$ 表示. 变形后的臂形记为第 k 个臂形, 相应参数变量以右上角标 k 表示.

1.1 基于 DH 模型的可变形臂运动学分析

根据 DH 表示法^[41], 在操作臂的运动学模型中, 存在 4 个参数, 分别是:

- 1) a_{i-1} : 沿 X_{i-1} 轴, 从 Z_{i-1} 移动到 Z_i 的距离;
- 2) α_{i-1} : 绕 X_{i-1} 轴, 从 Z_{i-1} 旋转到 Z_i 的角度;
- 3) d_i : 沿 Z_i 轴, 从 X_{i-1} 移动到 X_i 的距离;
- 4) θ_i : 绕 Z_i 轴, 从 X_{i-1} 旋转到 X_i 的角度.

本文中, Z_i 轴是第 i 个关节的旋转轴, X_{i-1} 轴是第 $i-1$ 个轴和第 i 轴的公垂线. 当第 i 个关节是旋转关节时, 可控变量是参数 θ_i ; 当第 i 个关节是平动关节时, 可控变量是参数 d_i .

传统刚性臂的臂形在制造完成后不再发生变化. 而可变形连杆能够根据任务需求在三维立体空间中

弯曲成一定形状. 因此, 可变形连杆的引入, 对于操作臂的模型参数产生了巨大影响.

假设可变形连杆为第 $i-1$ 个连杆, 则如图 1 所示建立坐标系. 若关节 $i-1$ 与关节 i 都是旋转关节, 连杆 $i-1$ 的改变使关节轴 i 、关节轴 $i-1$ 与关节轴 i 的公垂线发生了变化, 即 d_{i-1} , α_{i-1} , a_{i-1} , d_i 发生变化. 同时, 在电机未旋转的情况下, 关节角 $\theta_{i-1}^{(k-1)}$ 和 $\theta_i^{(k-1)}$ 分别变化为了 $\theta_{i-1}^{(k)}$ 和 $\theta_i^{(k)}$. 因此, 需额外标定偏移量 $\Delta\theta_{i-1} = \theta_{i-1}^{(k)} - \theta_{i-1}^{(k-1)}$, $\Delta\theta_i = \theta_i^{(k)} - \theta_i^{(k-1)}$. 而连杆 $i-1$ 的改变对于更前或更后的关节没有影响.

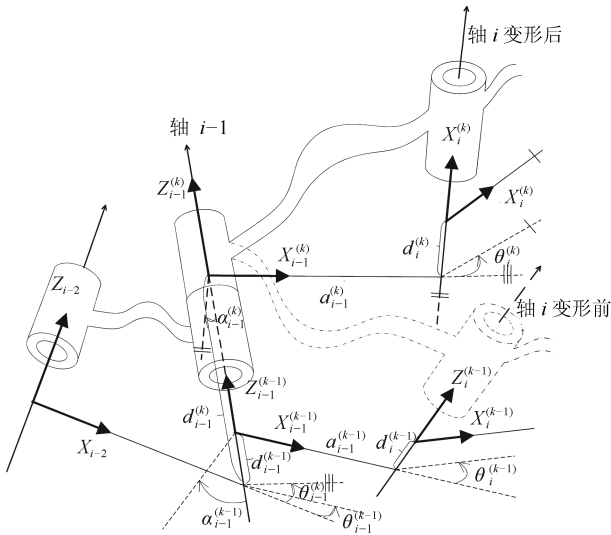


图 1 可变形连杆发生形变后对 DH 参数的影响
Fig.1 The change in DH parameters caused by the deformable link

同理分析, 若关节 $i-1$ 与关节 i 都是平动关节, 则需标定 θ_{i-1} , α_{i-1} , a_{i-1} , θ_i , Δd_{i-1} , Δd_i ; 若关节 $i-1$ 是平动关节, 关节 i 是旋转关节, 则需标定 θ_{i-1} , α_{i-1} , a_{i-1} , d_i , Δd_{i-1} , $\Delta\theta_i$; 若关节 $i-1$ 是旋转关节, 关节 i 是平动关节, 则需标定 d_{i-1} , α_{i-1} , a_{i-1} , θ_i , $\Delta\theta_{i-1}$, Δd_i .

因此, 每个可变形连杆可引起 6 个参数需重新标定. 但当两个可变形连杆相邻时, 前一个连杆导致的需要标定的参数 d_i (或 Δd_i) 和 $\Delta\theta_i$ (或 θ_i) 与后一个连杆导致的需要标定的参数 d_{i-1} (或 Δd_{i-1}) 和 $\Delta\theta_{i-1}$ (或 θ_{i-1}) 是相同的. 定义 n_l 为操作臂的可变形连杆数, n_j 为前后两个连杆都为可变形连杆的关节数, n_p 为需要重新标定的变量数, 则可以容易地得到

$$n_p = 6n_l - 2n_j \quad (1)$$

1.2 基于旋量模型的可变形臂运动学分析

给定世界坐标系 $\{S\}$ 和工具坐标系 $\{T\}$, 依照

旋量理论的运动学建模法则^[42], 一个具有 n 自由度的操作臂的正运动学可表示为

$$g_{st}(\theta) = \exp(\hat{\xi}_1\theta_1) \cdots \exp(\hat{\xi}_n\theta_n) g_{st}(0) \quad (2)$$

其中, $g_{st}(0)$ 为工具坐标系 $\{T\}$ 相对于世界坐标系 $\{S\}$ 的初始位姿; $\xi_i = [v_i, \omega_i]^T \in \mathbf{R}^6$ 是关节 i 对应的旋量坐标; $\hat{\xi}_i \in se(3)$ 是 ξ_i 对应的旋量, 可表示为

$$\hat{\xi}_i = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_i & v_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\hat{\omega}_i \in so(3)$ 是 $\omega_i \in \mathbf{R}^3$ 对应的反对称矩阵; $\exp(\hat{\xi}_i\theta_i)$ 是 $\hat{\xi}_i\theta_i$ 的指数映射.

对于旋转关节, ω_i 是第 i 个关节的旋转轴, $v_i = -\omega_i \times q_i$, 其中 q_i 是轴上一点; 对于平动关节, $\omega_i = \mathbf{0}_{3 \times 1}$, 而 v_i 是关节 i 的旋进方向.

如图 2 所示, 在连杆 $i-1$ 形状发生改变后, 引起的不仅是关节 i 的轴向量的改变. 由于旋量模型中, 各关节旋量均是关节轴处于初始位形时在世界坐标系 $\{S\}$ 中的表示. 因此, 在可变形臂的连杆形状发生变化后, 需要以改变后的位形为初始位姿 $g_{st}^{(k)}(0)$, 重新求取其在世界坐标系 $\{S\}$ 下的旋量坐标. 因此, 可变形臂需要标定的变量数是固定的.

$$n_p = 2n + 1 \quad (4)$$

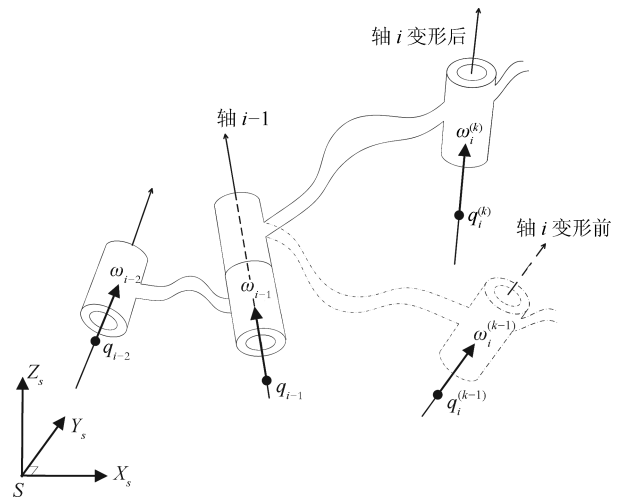


图 2 可变形连杆发生形变后对旋量参数的影响
Fig.2 The change in screw parameters caused by the deformable link

在实际应用中, 可以灵活处理. 例如本文所述的四自由度操作臂, 其肩部关节与基座固联, 由两个相互垂直的关节组成. 因此, 在标定时只需标定肘部及以下的关节参数, 而肩部关节可根据几何关系及两个电机的关节角直接求解.

2 可变形操作臂的设计与实现

本文设计了一个具有四自由度的可变形操作臂, 该臂由刚性关节和可变形连杆组成, 可变形连杆能够在三维立体空间中弯曲成一定形状, 并能保持相应形状, 如图 3 所示. 当施加在连杆上的外力在连杆承受力之内时, 可变形连杆的形状不会改变, 可视作刚体; 当施加在连杆上的外力超过限定值时, 可变形连杆能够在三维立体空间中弯曲成一定形状并保持^[26].

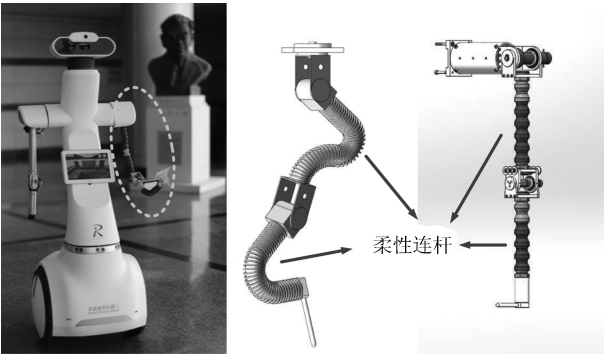


图 3 可变形操作臂样机

Fig. 3 Prototype of the deformable manipulator

本文设计的可变形臂具有 4 个自由度 2 个可变形连杆. 其中, 肩部 2 个自由度, 肘部和腕部各 1 个. 可变形连杆使用数控机床中常见的冷却管, 成本低廉.

相对于传统刚性臂, 可变形臂可根据任务需求改变连杆形状, 从而适应多种多样的任务需求. 如图 4 所示, 给定两个任务空间, 其中一个是水平的任务空间, 另一个是竖直的任务空间. 传统刚性臂的工作空间固定, 面临不同工作任务时灵巧度不够, 而可变形连杆可通过改变连杆形状分别获得与任务空间重合度更大的工作空间, 从而使得操作臂末端能以更合适的姿态达到目标点, 灵巧度更高.

3 可变形操作臂的参数标定

本文分别基于 DH 模型和旋量模型, 提出了基于视觉标志间相对位姿测量的标定方法. 该算法可快速高效地获取可变形臂的运动学参数, 且对摄像机的安装位置要求不严格. 为阐述方便, 本文所述算法针对一个具有 4 个自由度和 2 个可变形连杆的串联操作臂展开介绍, 如图 5 所示. 需要指出, 本文所述标定方法不只适用于此种构型的可变形臂, 可以通过更改标志块的位置推广到其他臂形.

对于标志块的张贴方法, 需要注意: 1) 一个可变形连杆的两端必须张贴标志块, 以对可变形连杆的形状改变提供足够多的信息; 2) 基坐标系必须张

贴标志块; 3) 为简单起见, 建议在可变形连杆两端的关节上张贴标志块. 但并不要求必须在关节上; 4) 张贴标志块的最小个数依赖于可变形连杆的数量, 如果可变形连杆数量为 n_l , 则需要张贴标志块的最小个数为 $n_l + 1$.

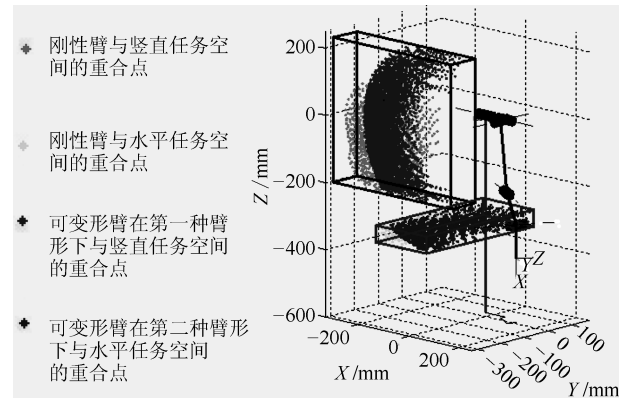


图 4 可变形操作臂和传统刚性臂的工作空间与不同任务空间的重合度比较

Fig. 4 Comparison of the deformable and rigid manipulator facing two task spaces

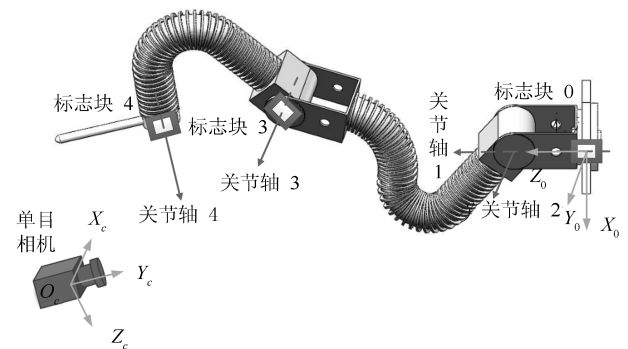


图 5 具有两个可变形连杆的四自由度操作臂及其标定系统
Fig. 5 A deformable manipulator with four DOFs and two deformable links and its calibration system

可变形臂的标定系统由一个单目相机和三个标志块组成, 如图 5 所示. 三个标志块分别固定在基座、关节 3 和关节 4 处. 由于算法测量的是标志块间的相对位姿, 而不依赖摄像机的绝对位置, 因此, 本文算法对单目相机的安装位置要求不严格, 而只需满足标志块在相机的视野内.

3.1 基于 DH 模型的可变形操作臂参数标定方法

依照 DH 表示法建立可变形操作臂的 DH 模型^[41], 如图 6 所示, 相应的 DH 参数见表 1. 表 1 中, L_w 为末端执行器长度 (本文中 $L_w = 100 \text{ mm}$), θ_i 是由码盘获取的关节角.

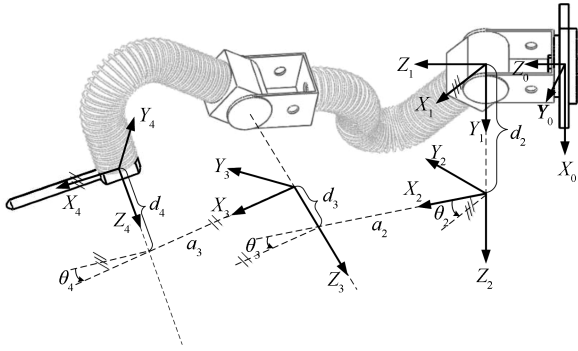


图6 可变形操作臂的DH模型

Fig. 6 DH model of the deformable manipulator

表1 可变形操作臂DH参数表

Table 1 DH parameters of the deformable manipulator

i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	θ_1	d_1
2	$-\pi/2$	0	$\theta_2 + \Delta\theta_2$	d_2
3	α_2	a_2	$\theta_3 + \Delta\theta_3$	d_3
4	α_3	a_3	$\theta_4 + \Delta\theta_4$	d_4
w	0	L_w	0	0

由第1节分析可知, 需要重新标定的参数包括 $\Delta\theta_2$, d_2 , α_2 , a_2 , d_3 , $\Delta\theta_3$, α_3 , a_3 , d_4 , $\Delta\theta_4$. 因此, 对于如图6所示的四自由度可变形臂, 共有10个DH参数需要标定, 如表1所示.

然后利用单目相机求取标志块间的相对位姿. 单目相机通过采集标志块的图像, 得到相机与标志块之间的相对位姿关系, 进而求得标志块之间的相对位姿关系^[28]. 记标志块4与标志块3间的齐次变换矩阵为 ${}_{M_4}^{M_3}T$, 标志块3与标志块0间的齐次变换矩阵为 ${}_{M_3}^{M_0}T$.

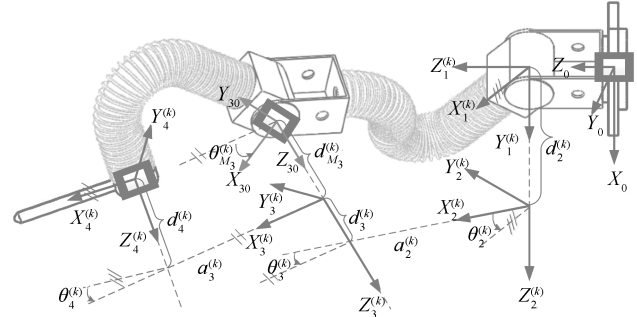
$$\begin{cases} {}_{M_4}^{M_3}T = ({}^c_{M_3}T)^{-1} {}^c_{M_4}T \\ {}_{M_3}^{M_0}T = ({}^c_{M_0}T)^{-1} {}^c_{M_3}T \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\{c\}$ 为相机坐标系, ${}^c_{M_0}T$, ${}^c_{M_3}T$, ${}^c_{M_4}T$ 为标志块0、标志块3、标志块4相对于相机坐标系 $\{c\}$ 的齐次变换矩阵.

最后利用标志块求取DH参数. 由于关节坐标系已经偏移到空间中, 不能直接获得, 因此只能通过张贴在刚性关节上的标志块间接求取.

如图7所示, 通过单目视觉可求取标志块坐标系与前后关节坐标系的关系, 但由于连杆的形变, 标志块坐标系和关节坐标系之间的关系也不固定, 会随着连杆形状的变化而改变. 在第 k 个臂形下, 标志块0、标志块3、标志块4的坐标系 $\{M_0\}$ 、 $\{M_3\}$ 、 $\{M_4\}$ 与基坐标系 $\{0\}$, 3 关节坐标系 $\{3^{(k)}\}$, 4 关节

坐标系 $\{4^{(k)}\}$ 之间: 1) $Z_3^{(k)}$ 与 Z_{M_3} 重合; 2) $\{3^{(k)}\}$ 的原点已经沿着 $Z_3^{(k)}$ 偏移到操作臂本体外. 设 $\{3^{(k)}\}$ 的原点与 $\{M_3\}$ 原点在 $Z_3^{(k)}$ 轴上的节距为 $d_{M_3}^{(k)}$, $X_3^{(k)}$ 轴与 X_{M_3} 轴的夹角为 $\theta_{M_3}^{(k)}$, 臂形改变后, $\{3^{(k)}\}$ 与 $\{M_3\}$ 的相对位姿关系会随 $d_{M_3}^{(k)}$ 和 $\theta_{M_3}^{(k)}$ 的变化而改变.

图7 第 k 个臂形下可变形操作臂DH模型示意图Fig. 7 DH model of the deformable manipulator in the k -th configuration

因此, 利用标志块坐标系得到关节坐标系所付出的代价是需要额外标定两个参数 $d_{M_3}^{(k)}$ 和 $\theta_{M_3}^{(k)}$. 为求取操作臂的DH参数与标志块坐标系之间的关系, 设想如下一个虚拟操作臂: 其关节1和关节2与实际操作臂相同, 而将标志块3视作虚拟关节3, 标志块4视作虚拟关节4. 则对此虚拟操作臂重新建立DH模型, DH参数见表2, 带下划线的参数需要进行标定.

表2 第 k 个臂形下虚拟操作臂的DH模型参数表Table 2 DH parameters of the virtual manipulator in the k -th configuration

$i^{(k)}$	$\alpha_{i-1}^{(k)}$	$a_{i-1}^{(k)}$	$\theta_i^{(k)}$	$d_i^{(k)}$
1	0	0	θ_1	d_1
2	$-\pi/2$	0	$\theta_2 + \underline{\Delta\theta_2^{(k)}}$	$\underline{d_2^{(k)}}$
3	$\underline{\alpha_2^{(k)}}$	$\underline{a_2^{(k)}}$	$\theta_3 + \underline{\Delta\theta_3^{(k)}} + \theta_{M_3}^{(k)}$	$\underline{d_3^{(k)}} + d_{M_3}^{(k)}$
4	$\underline{\alpha_3^{(k)}}$	$\underline{a_3^{(k)}}$	$\theta_4 + \underline{\Delta\theta_4^{(k)}} - \theta_{M_3}^{(k)}$	$\underline{d_4^{(k)}} - d_{M_3}^{(k)}$
w	0	L_w	0	0

因此, 需要标定12个未知参数, 分别是 $\Delta\theta_2^{(k)}$, $d_2^{(k)}$, $\alpha_2^{(k)}$, $a_2^{(k)}$, $\Delta\theta_3^{(k)}$, $d_3^{(k)}$, $\alpha_3^{(k)}$, $a_3^{(k)}$, $\Delta\theta_4^{(k)}$, $d_4^{(k)}$, $d_{M_3}^{(k)}$, $\theta_{M_3}^{(k)}$. 表中 $\theta_i^{(k)}$ 是已知量, 为计算方便, 在标定时转动关节使得 $\theta_i^{(k)} = 0$.

假设标志块0坐标系与基坐标系重合, 可得

$$\begin{cases} {}_{M_3}^{M_0}T = {}_3^0T = {}_1^0T \cdot \underline{{}_2^1T} \cdot {}_3^2T \\ {}_{M_4}^{M_3}T = {}_4^3T \end{cases} \quad (6)$$

其中, ${}^{M_0}T$ 和 ${}^{M_3}T$ 由相机求得, 0_3T 和 3_4T 根据虚拟操作臂的 DH 模型正运动学求得. 假设

$${}^{M_0}T_{M_3} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_x \\ u_{21} & u_{21} & u_{21} & u_y \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^{M_3}T_{M_4} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_x \\ t_{21} & t_{21} & t_{21} & t_y \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

首先, 通过 ${}^{M_3}T_{M_4} = {}^3_4T$ 可以求解 $\alpha_3^{(k)}$, $\Delta\theta_4^{(k)}$, $\theta_{M_3}^{(k)}$, $d_4^{(k)}$, $d_{M_3}^{(k)}$ 和 $a_3^{(k)}$

$$\begin{cases} \alpha_3^{(k)} = \arctan(\pm\sqrt{1-t_{33}^2}, t_{33}) \\ \Delta\theta_4^{(k)} = \arctan\left(\frac{t_{31}}{s\alpha_3^{(k)}}, \frac{t_{32}}{s\alpha_3^{(k)}}\right) \\ \theta_{M_3}^{(k)} = \arctan\left(-\frac{t_{13}}{s\alpha_3^{(k)}}, -\frac{t_{23}}{s\alpha_3^{(k)}}\right) \\ d_4^{(k)} = \frac{s\theta_{M_3}^{(k)}t_x + c\theta_{M_3}^{(k)}t_y}{s\theta_{M_3}^{(k)}t_{13} + c\theta_{M_3}^{(k)}t_{23}} \\ d_{M_3}^{(k)} = d_4^{(k)}t_{33} - t_z \\ a_3^{(k)} = \frac{t_x t_{23} - t_y t_{13}}{s\theta_{M_3}^{(k)}t_{13} + c\theta_{M_3}^{(k)}t_{23}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\alpha_3^{(k)}$ 符号不确定, 故有两组解. 利用 $a_3^{(k)} \geq 0$ 来确定两组解中较合理的解.

再次, 通过 ${}^{M_0}T_{M_3} = {}^0_3T$ 求取 $\alpha_2^{(k)}$, $\Delta\theta_2^{(k)}$, $\Delta\theta_3^{(k)}$, $d_3^{(k)}$, $d_2^{(k)}$ 和 $a_2^{(k)}$

$$\begin{cases} \alpha_2^{(k)} = \arctan\left(\pm\sqrt{1-u_{23}^2}, u_{23}\right) \\ \Delta\theta_2^{(k)} = \arctan\left(\frac{u_{13}}{s\alpha_2^{(k)}}, \frac{u_{33}}{s\alpha_2^{(k)}}\right) \\ \Delta\theta_3^{(k)} = \arctan\left(\frac{u_{21}}{s\alpha_2^{(k)}}, \frac{u_{22}}{s\alpha_2^{(k)}}\right) - \theta_{M_3}^{(k)} \\ d_3^{(k)} = \frac{s\Delta\theta_2^{(k)}u_x + c\Delta\theta_2^{(k)}(u_z - d_1)}{u_{13}s\Delta\theta_2^{(k)} + u_{33}c\Delta\theta_2^{(k)}} - d_{M_3}^{(k)} \\ d_2^{(k)} = (d_{M_3}^{(k)} + d_3^{(k)})u_{23} - u_y \\ a_2^{(k)} = \frac{u_x u_{33} - u_{13}(u_z - d_1)}{u_{13}s\Delta\theta_2^{(k)} + u_{33}c\Delta\theta_2^{(k)}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\alpha_2^{(k)}$ 符号不确定, 故有两组解, 利用 $\alpha_2^{(k)} \geq 0$ 来判断哪一组解更合理. 当 $(t_{13}||t_{23}) = 0$ 时, 求解结果略有不同, 详见文献 [26]. 在所辨识的参数初值的基础上, 可进一步通过卡尔曼滤波的方法对标定结果进行优化. 优化方法和过程详见文献 [41].

3.2 基于旋量模型的可变形操作臂参数标定方法

依照旋量理论的运动学建模法则^[42], 建立可变形操作臂的旋量模型, 如图 8 所示.

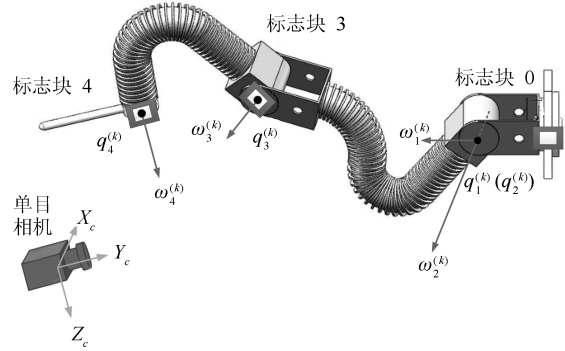


图 8 基于旋量理论的可变形操作臂运动学模型

Fig. 8 Kinematics model of the deformable manipulator based on screw theory

可变形操作臂拥有 4 个自由度, 其各关节旋量为 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$. 相应参数为

$$\begin{cases} \omega_1 = [0, 1, 0]^T, & q_1 = [0, 0, 0]^T \\ \omega_2 = [\omega_{2x}, \omega_{2y}, \omega_{2z}]^T, & q_2 = [0, 0, 0]^T \\ \omega_3 = [\omega_{3x}, \omega_{3y}, \omega_{3z}]^T, & q_3 = [q_{3x}, q_{3y}, q_{3z}]^T \\ \omega_4 = [\omega_{4x}, \omega_{4y}, \omega_{4z}]^T, & q_4 = [q_{4x}, q_{4y}, q_{4z}]^T \end{cases} \quad (11)$$

设可变形操作臂初始状态下的位姿是 $g_{st}(0)$, 若给定各个关节的改变量是 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$, 则关节改变后末端执行器相对于基坐标系的位姿 $g_{st}(\theta)$ 为

$$g_{st}(\theta) = e^{\xi_1\theta_1} e^{\xi_2\theta_2} e^{\xi_3\theta_3} e^{\xi_4\theta_4} g_{st}(0) \quad (12)$$

连杆形状改变后, 可变形臂旋量模型的参数也发生改变. 对于如图 8 所示的可变形操作臂, 关节 1 的旋量坐标不随连杆形状的改变而改变, 不需重新标定. 关节 2 可根据关节 1 和关节 2 的几何关系, 由上一臂形下的旋量坐标及关节角 θ_1 方便地推出.

$$[\omega_{2x}^{(k)}, \omega_{2y}^{(k)}, \omega_{2z}^{(k)}]^T = [-\sin\theta_1^{(k)}, \cos\theta_1^{(k)}, 0]^T \quad (13)$$

关节 1 和关节 2 的轴上一点 q_1 和 q_2 可选择为关节轴 1 和关节轴 2 的交点. 该点不随连杆形状变化而变化, 也无需重新标定.

因此, 在连杆形状改变后, 需要重新标定的参数是 $\omega_3, \omega_4, q_3, q_4$. 同时, 新臂形下的初始位姿 $g_{st}^{(k)}(0)$ 也需要重新求取.

从标志块位姿信息中可以得到需要标定的参数, 如图 8 所示. 由 ${}^0_{M_3}T$ 和 ${}^0_{M_4}T$ 可求得需要标定的矢量.

$$\begin{cases} [\omega_{3x}^{(k)}, \omega_{3y}^{(k)}, \omega_{3z}^{(k)}, 0]^T = {}^0_{M_3}T[0, 0, 1, 0]^T \\ [\omega_{4x}^{(k)}, \omega_{4y}^{(k)}, \omega_{4z}^{(k)}, 0]^T = {}^0_{M_4}T[0, 0, 1, 0]^T \\ [q_{3x}^{(k)}, q_{3y}^{(k)}, q_{3z}^{(k)}, 1]^T = {}^0_{M_3}T[0, 0, 0, 1]^T \\ [q_{4x}^{(k)}, q_{4y}^{(k)}, q_{4z}^{(k)}, 1]^T = {}^0_{M_4}T[0, 0, 0, 1]^T \end{cases} \quad (14)$$

假设标志块的张贴位置使得标志块 0 坐标系 $\{M_0\}$ 相对于基坐标系 $\{0\}$ 的变换矩阵为 ${}^0_{M_0}T$ (为求取方便, 通常使 ${}^0_{M_0}T = I_4$), 工具坐标系相对于标志块 4 坐标系 $\{M_4\}$ 的变换矩阵为 ${}^w_{M_4}T$, 则初始位姿 $g_{st}^{(k)}(0)$ 为

$$g_{st}^{(k)}(0) = {}^0_{M_0}T \cdot {}^0_{M_4}T \cdot {}^w_{M_4}T \quad (15)$$

在所辨识的参数初值的基础上, 可进一步通过卡尔曼滤波的方法对标定结果进行优化. 优化方法和过程详见文献 [41].

3.3 基于 DH 模型的标定算法与基于旋量的标定算法的比较

基于 DH 表示法的建模方法是操作臂建模中最常用的方法. DH 表示法在处理传统刚性操作臂时简单明了, 但在处理连杆形状可以改变的可变形操作臂时, 却有其不足之处.

首先, 在运动学模型上, DH 表示法下的可变形操作臂模型不再如刚性操作臂模型一般简单明了. 可变形操作臂形状不规则, 关节轴之间不再是垂直或平行的关系, 这使得正运动学中操作臂末端的相对位姿表达式不再简便. 而在旋量模型中, 利用旋量的指数形式表示, 使得操作臂的模型简单明了.

其次, 在标定过程中, 难以直接求取 DH 模型下各关节的坐标系位姿. DH 表示法下各关节的坐标系会脱离操作臂本体, 沿着关节轴线平移到空间中, 因此只能通过操作臂本体上的标志块, 间接求取关节坐标系位姿. 而旋量模型中需要标定的参数是轴向量 ω_i 及轴上一点 q_i , 而这些变量可以方便地通过标志块直接求取.

最后, 在 DH 模型下, 关节角的零点是根据关节轴之间的几何关系确定的. 但是对于可变形操作臂, 由于连杆形状的改变, 使得关节角产生了额外的偏移量需要标定. 但在旋量模型中, 可以以任意位置为零点, 这给可变形臂的建模带来了极大的便利.

综上所述, 旋量模型与 DH 模型相比, 更适用于

可变形操作臂的建模.

4 可变形操作臂的参数标定实验分析

4.1 基于 DH 模型的可变形臂参数标定实验分析

基于 DH 模型的可变形操作臂参数标定实验平台见图 9, 设图 9 中的可变形操作臂在第 k 个臂形下.

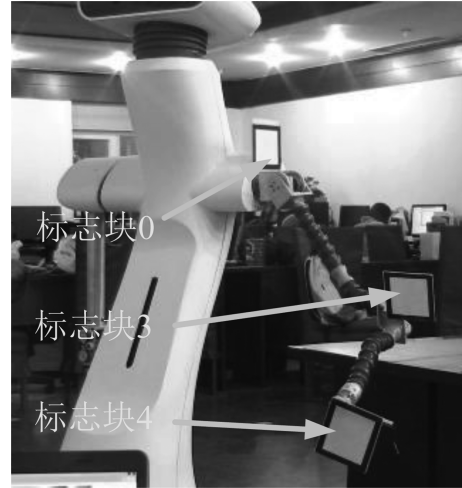


图 9 可变形操作臂参数标定的实验平台

Fig. 9 Experimental platform for parameters calibration of the deformable manipulator

第 k 个臂形下得到的参数标定结果见表 3, 表 3 中有下划线的部分是标定所得的参数的初值, 标定后可变形臂的参数全部为已知量.

表 3 可变形操作臂第 k 个臂形的参数标定的初值的结果
Table 3 The raw calibration results of the deformable manipulator in the k -th configuration

$i^{(k)}$	$\alpha_{i-1}^{(k)}$	$a_{i-1}^{(k)}$	$\theta_i^{(k)}$	$d_i^{(k)}$
1	0	0	θ_1	d_1
2	-90°	0	$\theta_2 + (-2.81^\circ)$	<u>-150.60</u>
3	<u>-81.97°</u>	<u>269.46</u>	$\theta_3 + (-7.28^\circ)$	<u>-116.54</u>
4	<u>138.73°</u>	<u>160.08</u>	$\theta_4 + (-109.26^\circ)$	<u>29.13</u>
w	0	Lw	0	0

对所得参数的初值进行误差分析结果见表 4. 误差分析是在不同关节角下采集多组操作臂图像, 将表 3 中的参数代入 DH 运动学模型得到可变形操作臂的末端位姿, 与采集图像所得的操作臂末端位姿相比较, 得到误差结果.

由表 4 可知, 基于视觉标志块间相对位姿测量获得的参数初值还存在一定误差, 但平均位置误差不超过 40 mm, 平均姿态误差不超过 5° , 说明本文

所述方法获得的参数初值在真值附近. 在所辨识参数初值的基础上, 进一步通过卡尔曼滤波方法^[41] 对标定结果进行优化, 优化后的实验结果是: 位置误差为 9.41 ± 5.07 mm, 欧拉角姿态误差为 $3.52 \pm 1.97^\circ$.

表 4 可变形臂 DH 参数标定的初值的位姿误差

Table 4 Pose errors of the deformable manipulator based on raw calibrated DH parameters

误差类型		误差分量	
位置误差 (mm)	39.95 ± 12.82	X	-13.54 ± 13.41
		Y	26.54 ± 7.76
		Z	19.17 ± 16.57
欧拉角姿态误差 ($^\circ$)	4.66 ± 0.86	α	-0.30 ± 0.36
		β	0.66 ± 0.33
		γ	3.61 ± 0.62

通过提高单目相机标志块位姿测量的精度、降低固定标志块的误差等方式可进一步提升参数标定精度, 但受限于可变形臂连杆的材料特性, 其标定精度难以与工业操作臂相比. 但可变形臂面临的是家庭中如点触屏幕等任务, 对精度的要求也较低. 因此, 本文所示的操作臂的标定精度, 能够满足大多数家庭中作业任务的要求.

4.2 基于旋量模型的可变形臂参数标定实验分析

基于旋量理论的可变形操作臂标定实验平台, 与基于 DH 模型的标定平台相同, 1 台佳能单目相机, 3 个标志块. 不同于 DH 模型的是, 在第 k 个臂形下, 实验中需要首先求取初始位姿 $g_{st}^{(k)}(0)$, 并记录此时的关节位置为关节角为 0 的位置, 继而求得此初始位姿下需要标定的参数.

对标定的参数的初值进行误差分析结果见表 5. 误差分析是通过采集多组不同关节角下的操作臂图像, 将标定所得参数的初值代入旋量模型得到可变形臂末端位姿, 再与采集的图像所得的操作臂末端位姿相比较, 得到误差结果.

由表 5 可知, 基于视觉标志块间相对位姿测量获得的参数初值还存在一定误差, 但平均位置误差不超过 40 mm, 平均姿态误差不超过 1° , 说明本文所述方法获得的参数初值在真值附近. 在所辨识参数的初值的基础上, 进一步通过卡尔曼滤波的方法^[41] 对标定结果进行优化, 优化后的实验结果是: 位置误差为 4.12 ± 3.18 mm, 欧拉角姿态误差为 $1.91 \pm 1.03^\circ$.

对比基于 DH 模型和旋量模型的参数标定结果, 两者标定的初值的位置误差结果相近, 而姿态误差

中旋量模型要优于 DH 模型. 经过卡尔曼滤波优化后, 旋量模型的标定结果明显优于 DH 模型. 因此, 旋量模型参数更适用于可变形操作臂.

表 5 可变形臂旋量模型参数标定的初值的位姿误差

Table 5 Pose errors of the deformable manipulator based on raw calibrated screw parameters

误差类型		误差分量	
位置误差 (mm)	39.57 ± 22.31	X	-30.61 ± 24.13
		Y	4.21 ± 14.83
		Z	-4.88 ± 17.31
欧拉角姿态误差 ($^\circ$)	0.25 ± 0.18	α	0.09 ± 0.17
		β	0.05 ± 0.08
		γ	-0.03 ± 0.04

5 可变形操作臂点触作业实例

本文通过安装在家服机器人“小南”上的四自由度可变形操作臂来完成点触任务作业. 操作臂运动学参数是基于旋量模型的参数, 由前述标定算法获得. 实验装置如图 10 所示, 标志块 1 固结于机器人末端, 标志块 2 固结于操作平面. 本文分别设置了两个操作实例, 在第 1 个实例中机器人需要点触桌面上竖直放置的智能电视, 任务空间与图 4 中竖直任务空间类似. 在第 2 个实例中机器人需要点触桌面上的平板电脑, 任务空间与图 4 中水平任务空间类似. 每个点触实验均需多次点触操作平面. 操作臂通过安装在机器人头部的 Kinect 相机 (本文只使用了 RGB 图像) 适时测量手臂末端位姿和操作平面位置作为反馈, 然后控制手臂进行相应的点触操作. 相机图像大小为 640 像素 \times 480 像素, 反馈频率为 30 Hz.

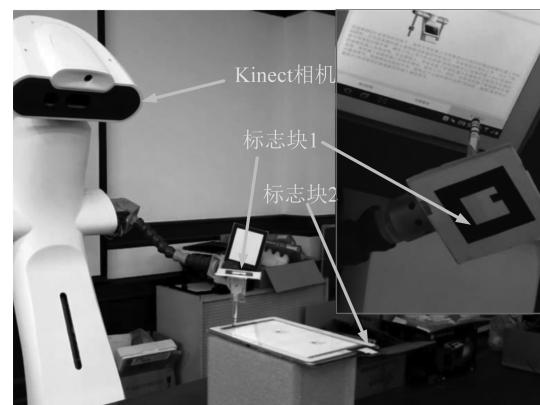


图 10 可变形操作臂点触任务实验设置

Fig. 10 The experiments setup for the deformable manipulator in touching tasks

5.1 仿真实验

首先通过仿真实验阐述在相同自由度情况下, 传统操作臂在点触任务操作中的不足. 仿真实验中任务空间设置为法向量为 $(1, 0, 0)^T$ 并通过点 $(-400, 0, 0)^T$ 的平面, 操作臂需到达平面中指定点, 以此模拟操作臂点触智能电视或平板的任务. 由于点触任务的特殊性, 本文在进行逆运动学求解过程中只给定了点触位置, 而放松了对点触姿态的要求. 只要点触操作时末端工具与操作平面法向量的夹角小于最大点触角 α_{\max} (本文设置为 $\alpha_{\max} = 25^\circ$), 则认为可完成点触任务. 实验设置操作臂的臂形为肩部两个垂直关节, 肘部关节与肩部二关节轴平行, 腕部关节与肘部关节轴垂直. 这是传统刚性臂最常见的构型.

图 11 和表 6 分别给出了 7 个点触位置的实验结果. 表 6 中前 4 个点分别对应图 11 中圆形标记的点, 表示存在能完成点触任务要求的逆解; 表 6 中第 5 个点对应图 11 中十字形标记的点, 表示操作臂末端位姿虽能到达目标点, 但由于点触角超过最大点触角而无法完成点触任务的实例; 表 6 中第 6 和第 7 个点对应图 11 中两个叉形标记的点, 表示操作臂无法到达目标点.

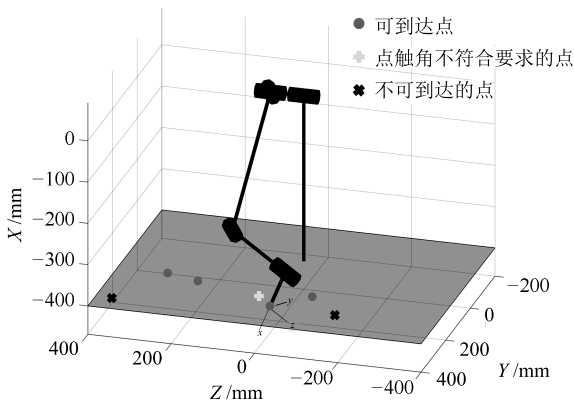


图 11 传统臂形下进行点触任务作业仿真实验

Fig. 11 The simulation of touching tasks by deformable manipulator in traditional configuration

实验表明单一臂形下的传统操作臂在面临点触任务时存在很大不足, 而可变形操作臂可通过改变臂形大大增加完成点触任务的可能性. 从仿真结果可以看出, 在单一臂形下, 经常会存在某些点触位置, 使得即使操作臂末端能够到达, 但因为点触角超过了最大点触角而无法完成的操作任务, 例如仿真结果中的第 5 个点. 这是传统刚性臂尤其是四自由度操作臂难以克服的困难. 但可变形操作臂可以通过改变手臂的臂形, 使手臂末端在操作区域附近时末端工具尽可能与操作平面垂直, 从而大大增加完

成点触任务的可能性. 这使得操作臂能够以较少的自由度完成传统刚性臂需要更多自由度才能完成的多种多样的点触任务, 减少操作臂成本.

表 6 传统臂形下进行点触任务作业仿真实验

Table 6 The simulation of touching tasks by deformable manipulator in traditional configuration

序号	点触目标点 (mm)	有效点触位姿点触角 α ($^\circ$)
1	$(-400.0, 280.0, -2.0)^T$	23.17
2	$(-400.0, 200.0, -80.0)^T$	17.77
3	$(-400.0, 160.0, 280.0)^T$	2.97
4	$(-400.0, 185.0, 200.0)^T$	18.17
5	$(-400.0, 230.0, 40.0)^T$	无解 (29.76)
6	$(-400.0, 290.0, -160.0)^T$	无解
7	$(-400.0, 340.0, 360.0)^T$	无解

5.2 不同任务空间下的点触任务实例

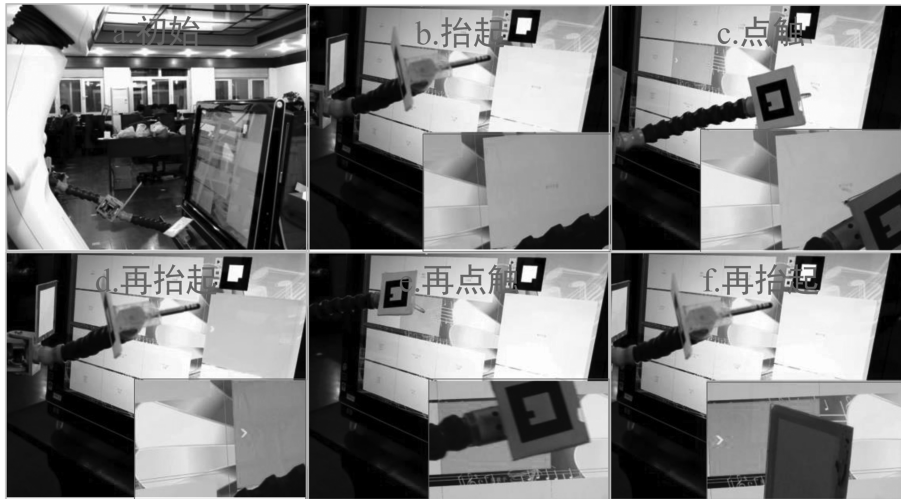
本文通过两组点触任务实例验证可变形臂在面临点触任务时的优势. 如图 12 所示, 在第 1 组实验中, 机器人需要连续两次点触桌面上竖直放置的智能电视. 在第 2 组实验中, 机器人需要连续两次点触桌面上的平板电脑. 在这两组实验中, 可分别调整可变形臂的可变形连杆使末端工具与操作平面近似垂直, 从而能以更合适的姿态到达目标点, 完成点触任务. 操作臂的运动学参数通过前述的基于旋量的标定方法获得.

在第 1 组实验中, 操作臂根据用户需求, 先后点触播放两首歌曲. 在第 2 组实验中, 操作臂通过连续两次点触操作, 进入到了微信公众号的子菜单“关于我们”下的“研究单位简介”, 成功返回了“单位简介”的消息内容. 实验中, 可变形臂在面临连续多次点触任务作业需求时依旧能够顺利完成点触任务. 因此, 可变形臂可通过连杆形状的改变获得更加灵巧的工作空间, 适合于家庭中非结构化的应用环境, 能够更有效地完成如点触任务等作业.

6 结论

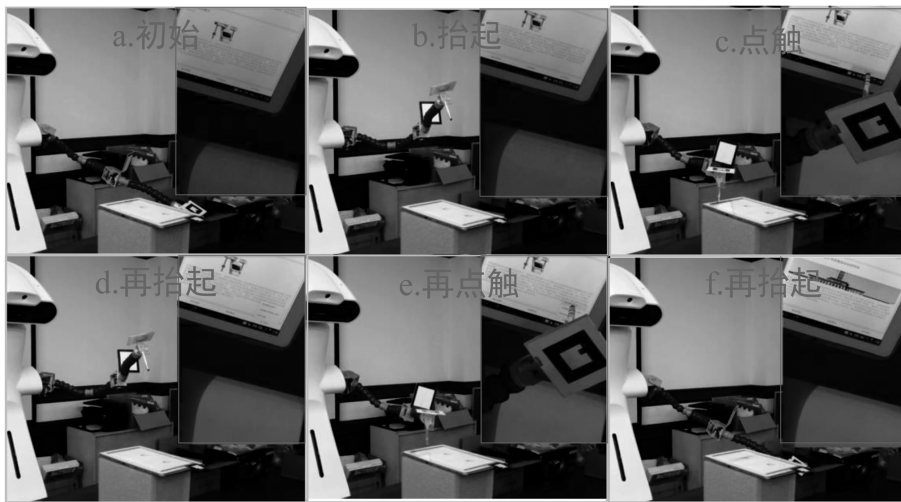
本文首次介绍了一种连杆形状可以改变的可变形操作臂, 对于家庭服务机器人走入家庭具有极其重要的意义. 该操作臂可通过改变连杆形状取得更灵巧的末端和更大的工作空间, 以满足家庭中多任务的需求. 同时, 与连续臂相比, 该操作臂也具有结构简单, 成本低廉的优势, 适合家庭服务用途.

本文分析了可变形臂连杆形状的改变对运动学参数的影响, 并分别基于 DH 模型和旋量模型阐述了可变形臂的运动学参数标定方法, 同时验证了标定结果的有效性. 可变形操作臂 DH 模型的参数标



(a) 可变形臂点触智能电视任务实例

(a) A touching task to operate smart TV for the deformable manipulator



(b) 可变形臂点触平板电脑任务实例

(b) A touching task to operate pad for the deformable manipulator

图 12 可变形操作臂点触任务实例

Fig. 12 The touching tasks for the deformable manipulator

定结果是: 位置误差 9.41 ± 5.07 mm, 欧拉角姿态误差 $3.52 \pm 1.97^\circ$ 。基于旋量模型的可变形操作臂的参数标定结果是: 位置误差为 4.12 ± 3.18 mm, 欧拉角姿态误差为 $1.91 \pm 1.03^\circ$ 。该精度虽然无法与工业臂相比, 但能够满足大多数家庭中作业任务的要求。实验和分析表明, 旋量模型更适用于可变形操作臂。该方法也很容易通过更改标志块的位置推广到其他。本文最后通过两组点触实例阐述了可变形臂在面临家庭中多任务需求时的优势。

References

- Huang Yun-Tian, Chen Wei-Dong, Sun Yi-Xiang. Safety design and realization of an assistive robotic manipulator based on collision detection. *Robot*, 2011, **33**(1): 40–45 (黄云天, 陈卫东, 孙逸翔. 基于碰撞检测的护理型操作臂的安全性设计与实现. *机器人*, 2011, **33**(1): 40–45)
- Li Z J, Chen W D. Adaptive neural-fuzzy control of uncertain constrained multiple coordinated nonholonomic mobile manipulators. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, **21**(7): 985–1000
- Rusu R B, Holzbach A, Diankov R, Bradski G, Beetz M. Perception for mobile manipulation and grasping using active stereo. In: *Proceedings of the 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Paris, France: IEEE, 2009. 632–638
- Cianchetti M, Follador M, Mazzolai B, Dario P, Laschi C. Design and development of a soft robotic octopus arm exploiting embodied intelligence. In: *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Saint Paul, Minnesota, USA: IEEE, 2012. 5271–5276
- Guglielmino E, Zullo L, Cianchetti M, Follador M, Branson D, Caldwell D G. The application of embodiment theory to the design and control of an octopus-like robotic arm. In: *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on*

- Robotics and Automation (ICRA). Saint Paul, Minnesota, USA: IEEE, 2012. 5277–5282
- 6 Mahl T, Hildebrandt A, Sawodny O. A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, **30**(4): 935–949
- 7 Calisti M, Arienti A, Renda F, Levy G, Hochner B, Mazzolai B, Dario P, Laschi C. Design and development of a soft robot with crawling and grasping capabilities. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Saint Paul, Minnesota, USA: IEEE, 2012. 4950–4955
- 8 Escande C, Chettibi T, Merzouki R, Coelen V, Pathak P M. Kinematic calibration of a multisection bionic manipulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, **20**(2): 663–674
- 9 Jones B A, Walker I D. Kinematics for multisection continuum robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(1): 43–55
- 10 Escande C, Pathak P M, Merzouki R, Coelen V. Modelling of multisection bionic manipulator: application to robotinoXT. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Karon Beach, Phuket, Thailand: IEEE, 2011. 92–97
- 11 Bergeles C, Gosline A H, Vasilyev N V, Codd P J, Nido P J, Dupont P E. Concentric tube robot design and optimization based on task and anatomical constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, **31**(1): 67–84
- 12 Dupont P E, Lock J, Itkowitz B. Real-time position control of concentric tube robots. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Anchorage, Alaska, USA: IEEE, 2010. 562–568
- 13 Gilbert H B, Neimat J, Webster R J. Concentric tube robots as steerable needles: achieving follow-the-leader deployment. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, **31**(2): 246–258
- 14 Rucker D C, Jones B A, Webster R J. A model for concentric tube continuum robots under applied wrenches. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Anchorage, Alaska, USA: IEEE, 2010. 1047–1052
- 15 Guo Xian, Ma Shu-Gen, Li Bin, Wang Ming-Hui, Wang Yue-Chao. Velocity tracking control of a snake-like robot with a dynamics and control unified model. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(11): 1847–1856
(郭宪, 马书根, 李斌, 王明辉, 王越超. 基于动力学与控制统一模型的蛇形机器人速度跟踪控制方法研究. *自动化学报*, 2015, **41**(11): 1847–1856)
- 16 Yang Gui-Zhi, Ma Shu-Gen, Li Bin, Wang Ming-Hui. A hierarchical connectionist central pattern generator model for controlling three-dimensional gaits of snake-like robots. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(10): 1611–1622
(杨贵志, 马书根, 李斌, 王明辉. 面向蛇形机器人的三维步态控制的层次化联结中枢模式生成器模型. *自动化学报*, 2013, **39**(10): 1611–1622)
- 17 Wang Zhi-Feng, Ma Shu-Gen, Li Bin, Wang Yue-Chao. Simulation and experimental study of an energy-based control method for the serpentine locomotion of a snake-like robot. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(5): 604–614
(王智锋, 马书根, 李斌, 王越超. 基于能量的蛇形机器人蜿蜒运动控制方法的仿真与实验研究. *自动化学报*, 2011, **37**(5): 604–614)
- 18 Yip M C, Camarillo D B. Model-less feedback control of continuum manipulators in constrained environment. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, **30**(4): 880–889
- 19 Wang H S, Chen W D, Yu X J, Deng T, Wang X Z, Pfeifer R. Visual servo control of cable-driven soft robotic manipulator. In: Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 57–62
- 20 Chen Wei, Yu Yue-Qing, Zhang Xu-Ping, Su Li-Ying. Vibration controllability of underactuated flexible manipulator. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(4): 391–398
(陈炜, 余跃庆, 张绪平, 苏丽颖. 欠驱动柔性机器人的振动可控性分析. *自动化学报*, 2007, **33**(4): 391–398)
- 21 Peng Ji-Gen, Ni Yuan-Hua, Qiao Hong. Neural network control of flexible-joint robot manipulators. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(2): 175–180
(彭济根, 倪远华, 乔红. 柔性关节机械手的神经网络控制. *自动化学报*, 2007, **33**(2): 175–180)
- 22 Santolaria J, Aguilar J J, Yagüe J A, Pastor J. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 2008, **32**(4): 251–268
- 23 Park I W, Lee B J, Cho S H, Hong Y D, Kim J H. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, **17**(6): 1059–1067
- 24 Angelidis A, Vosniakos G C. Prediction and compensation of relative position error along industrial robot end-effector paths. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, **15**(1): 63–73
- 25 Majarena A C, Santolaria J, Samper D, Aguilar J J. An overview of kinematic and calibration models using internal/external sensors or constraints to improve the behavior of spatial parallel mechanisms. *Sensors*, 2010, **10**(11): 10256–10297
- 26 Hao J. Research on Kinematics of Deformable Manipulator for Home Service Robots [Master thesis], Nankai University, China, 2015.
(郝洁. 家庭服务机器人可变形操作臂的运动学研究 [硕士学位论文], 南开大学, 中国, 2015.)
- 27 Lu X, Liu J T, Hao J, Zhang S, Sun L. Self-calibration of deformable arm with a monocular camera. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Bali, Indonesia, 2014. 861–866
- 28 Lu Xiang. Research and Application on Object Recognition and Pose Measurement Based on Monocular Camera [Ph. D. dissertation], Nankai University, China, 2015.
(卢翔. 单目目标识别及位姿测量算法研究与应用 [博士学位论文], 南开大学, 中国, 2015.)
- 29 Li G, Sun L, Lu X, Hao J, Liu J T. A practical, fast, and low-cost kinematic calibration scheme for a deformable manipulator by using leap motion. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Qingdao, China, 2016. 719–724
- 30 Nubiola A, Bonev I A. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar. *Precision Engineering*, 2014, **38**(3): 472–480
- 31 Mittendorfer P, Cheng G. Open-loop self-calibration of articulated robots with artificial skins. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Saint Paul, Minnesota, USA, 2012. 4539–4545
- 32 Roth Z, Mooring B, Ravani B. An overview of robot calibration. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, **3**(5): 377–385

- 33 Lightcap C, Hamner S, Schmitz T, Banks S. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(2): 452–456
- 34 He R B, Zhao Y J, Yang S N, Yang S Z. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(3): 411–423
- 35 Chen G L, Wang H, Lin Z Q. Determination of the identifiable parameters in robot calibration based on the POE formula. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, **30**(5): 1066–1077
- 36 Wang H X, Shen S H, Lu X. A screw axis identification method for serial robot calibration based on the POE model. *Industrial Robot*, 2012, **39**(2): 146–153
- 37 Chen I M, Yang G L, Tan C T, Yeo S H. Local POE model for robot kinematic calibration. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, **36**(11–12): 1215–1239
- 38 Okamura K, Park F C. Kinematic calibration using the product of exponentials formula. *Robotica*, 1996, **14**(4): 415–421
- 39 Gupta K. Kinematic analysis of manipulators using the zero reference position description. *The International Journal of Robotics Research*, 1986, **5**(2): 5–13
- 40 Kazerounian K, Qian G Z. Kinematic calibration of robotic manipulator. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 1989, **111**(4): 482–487
- 41 Craig J J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education International, 2005. 62–76
- 42 Murray R M, Li Z, Sastry S S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994. 52–54



郝洁 南开大学机器人与信息自动化研究所硕士研究生. 国家知识产权局专利局专利审查协作天津中心专利审查员. 2012 年获得河北工业大学学士学位. 2015 年获得南开大学硕士学位. 主要研究方向为家庭服务机器人.

E-mail: haojierobot@163.com

(**HAO Jie** Master student at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, patent examiner at the Patent Examination Cooperation Tianjin Center of the Patent Office.SIPO. She received her bachelor degree from Hebei University of Technology in 2012 and master degree from Nankai University in 2015. Her research interest covers home service robots.)



李高峰 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 2013 年获得南开大学学士学位. 主要研究方向为机器人视觉伺服, 李群, 操作臂运动学. 本文通信作者.

E-mail: gaofengli@mail.nankai.edu.cn

(**LI Gao-Feng** Ph. D. candidate at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. He received his bachelor degree from Nankai University in 2013. His

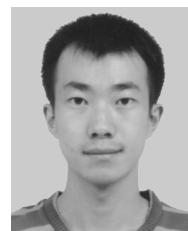
research interest covers robotic visual servoing, Lie group, and kinematics of manipulator. Corresponding author of this paper.)



孙雷 南开大学机器人与信息自动化研究所副教授. 1999 年获得天津大学学士学位. 2002 年获得天津大学硕士学位. 2005 年获得南开大学博士学位. 主要研究方向为机器人与自动控制, 网络遥操作机器人, 无线传感网络.

E-mail: sunl@nankai.edu.cn

(**SUN Lei** Associate professor at Nankai University. He received his bachelor and master degrees from Tianjin University, in 1999 and 2002, and Ph. D. degree from Nankai University, in 2005, respectively. His research interest covers robotics and automatic control, teleoperation of robots in networks, and wireless sensor network.)

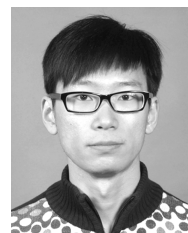


卢翔 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 2010 年获得南开大学学士学位. 2015 年获得南开大学博士学位. 主要研究方向为单目视觉.

E-mail: luxiangnk@hotmail.com

(**LU Xiang** Ph. D. candidate at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University.

He received his bachelor degree from Nankai University in 2010 and Ph. D. degree from Nankai University in 2015, respectively. His research interest covers monocular vision.)



张森 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 2011 年获得天津大学学士学位. 主要研究方向为移动机器人运动规划, 家庭服务机器人.

E-mail: zhangs@mail.nankai.edu.cn

(**ZHANG Sen** Ph. D. candidate at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. He received his bachelor degree from Tianjin University in 2011. His research interest covers motion planning of mobile robots, and home service robots.)



刘景泰 南开大学机器人与信息自动化研究所教授. 1983 年获得天津大学学士学位. 1986 年获得天津大学硕士学位. 1998 年获得南开大学博士学位. 主要研究方向为机器人技术, 计算机应用与信息自动化系统, 智能科学与技术.

E-mail: liujt@nankai.edu.cn

(**LIU Jing-Tai** Professor at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. He received his bachelor and master degrees from Tianjin University, in 1983 and 1986, and Ph. D. degree from Nankai University, in 1998. His research interest covers robotics, computer applications and information automation system and intelligence science and technology.)