

DOI: 10.3901/JME.2013.03.018

基于 Sarrus 结构的 5 自由度拟人手臂运动学研究*

廖 波¹ 尚建忠¹ ERNEST Appleton² 杨 政¹

(1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙 410073;

2. 英国杜伦大学工程与计算机学院 杜伦 DH1 3LE 英国)

摘要: 针对目前机器人拟人手臂的结构特点及局限, 提出一种将 Sarrus 结构作为运动关节的新型手臂, 并设计一种基于 Sarrus 结构的 5 自由度拟人手臂。为验证该优越性并研究其工作空间, 同时为结构设计优化提供基础, 用齐次坐标变换法对正向运动学进行分析, 推导出腕部质心到基准坐标系的姿态变换矩阵, 并通过数值计算, 得到手腕质心的轨迹曲线。分析结果表明基于 Sarrus 结构的拟人手臂在具备一般机器人手臂性能的同时, 还具有高度的柔性; 采用这种新型关节的手臂能够克服自身连杆的限制, 并且能够在结构上进一步拓展其工作空间, 满足不断变化的工作和环境需求。

关键词: Sarrus 机器人 拟人手臂 运动学 工作空间

中图分类号: TP24 TH11

Kinematics Analysis of a 5-DOF Anthropopathic Arm Based on Sarrus Linkage

LIAO Bo¹ SHANG Jianzhong¹ ERNEST Appleton² YANG Zheng¹

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, National University of

Defense Technology, Changsha 410073;

2. School of Engineering and Computer Science, Durham University, Durham DH1 3LE, UK)

Abstract: A novel robotic anthropopathic arm employing Sarrus linkage as its joints is proposed and a 5-DOF anthropopathic arm based on Sarrus linkage is designed according to the structure characteristics and deficiency of general robotic arms. In order to verify the advantages and lay a foundation for optimization of structure design, the forward kinematics characteristics are analyzed with homogeneous coordinates transformation method to obtain the workspace. The posture transformation matrix is derived. The trajectory of the centroid of wrist is plotted, and the results prove that the proposed robotic arm is possessed with common characteristics of general arms, and can extend its workspace. Besides, the robotic arm is highly flexible. The novel robotic anthropopathic arm with Sarrus linkage is able to overcome the limitations of links and expand the workspace, which is superior over other arms, to satisfy the needs of different working conditions.

Key words: Sarrus Robot Anthropopathic arm Kinematics Workspace

0 前言

机器人拟人手臂要实现期望的功能, 必须要有相应的运动关节来控制其移动和转动。大量文献表明^[1-5], 大多数手臂的动作都只包含有两种运动: 旋转运动和直线运动, 分别通过旋转副和移动副来实现。

随着人类探索研究领域的不断扩大, 传统的旋

转副和移动副逐渐不能满足手臂的动作需求, 各种新型运动关节不断被提出并应用。GUAN 等^[6]提出了一种单自由度模块化机器人关节, 该关节包含两种基本类型: T 型和 I 型。通过这两种类型模块的组合可以搭建成不同机器人手臂构型。MARK 等^[7]设计了一种由关节球和孔通过“肌腱”连接而成的关节, 结构简单, 适合小型化的需求。ELIE 等^[8]提出了一种具有超大运动空间的 3 自由度关节, 该关节一般用于空间超冗余机器人。刘海涛等^[9]对新型 5 自由度可重构混联机械手的创新设计和尺度综合问题进行了研究, 该机械手模块由 2 自由度球面并

* 国家自然科学基金资助项目(51175505)。20120407 收到初稿, 20121203 收到修改稿

联机构和一条通过滑移副与之串接的两转动—移动串联运动链组成。JIN 等^[10]对一种新型 6-SPS 并行三维平台的机械臂进行了研究, 并对这种并行机械臂的布局设计进行了详细描述。

以上几种关节都是针对特定目的要求而设计的, 对特定的手臂具备优越性, 不适用于一般用途。而且, 这些关节都是“刚性”关节, 即它们只能在手臂杆件的变化范围内改变其末端操作器的位姿, 而不能突破杆件的限制, 所以不能拓展其工作空间。从而使得手臂的机械结构柔性较差, 结构比较固定, 功能也比较单一, 因而限制了它们的应用和推广。

为此, 提出了一种将 Sarrus 结构作为新型关节的机器人拟人手臂。Sarrus 结构是 1853 年由 SARRUS 发明的一种自由度为 1 的古典机构, 是一种将有限圆周运动转换为直线运动的机械联动装置, 它还可以将直线运动转换为标准的旋转运动。并且在运动过程中, 自身尺寸会发生变化, 进而影响手臂的工作空间。因此, 它除了能够作为一般关节使用外, 还能充当杆件的作用, 进一步拓宽手臂工作空间, 从而减小机器人的整体结构尺寸。而且, 这种关节还能取代移动关节, 进而避免移动关节的使用。

近年来, 有不少关于 Sarrus 结构在机构及机器人结构应用方面的报道, RANJANA 等^[11]设计了一种仿生的独立爬行机器人, 而该机器人的线性滑动运动是通过 Sarrus 机构来实现的。GAVIN 等^[12]提出了一种用于公路车辆的新型主动悬架系统, 研究对象为悬挂臂的位移能够主动控制的套车, 在悬挂臂中也是采用了一种改进的 Sarrus 机构。KATIE 等^[13]设计了一种六足分段移动微型机器人。该机器人的独特之处在于其脊柱是高度灵活的, 而脊柱则是由 Sarrus 机构以及 flexure 组成。

有关 Sarrus 结构理论研究方面, 陆震等^[14]对 Sarrus 机构进行了研究, 得到了 Sarrus 机构能够产生理想的直线运动而没有任何侧滑这一结论。陈红亮等^[15]在对对称 3 自由度并联机器人拓扑结构型综合时, 对 Sarrus 机构的拓扑结构类型综合进行了详细分析, 并得到了机构运动的输出矩阵及相应结论。ZHANG 等^[16]采用一种新方法和新理论来对多环机构的自由度进行计算, 得到 Sarrus 机构的自由度为 1。

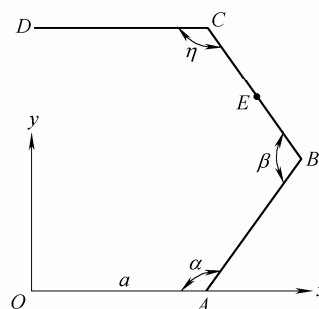
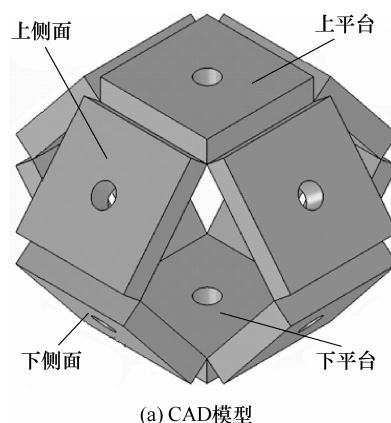
虽然 Sarrus 机构在机器人领域有不少应用, 但目前有关 Sarrus 机构应用于机器人手臂中的例子还鲜有报道。以基于 Sarrus 结构的拟人手臂为研究对象, 为验证该拟人手臂的优越性, 研究分析其工作空间以及运动特性, 对其正向运动学进行研究。

由于手臂采用了串并联组合的混合结构, 研究方法采用的是齐次坐标变换方法, 分析得到了手腕的姿态矩阵及其质心在基准坐标系下的位置轨迹方程, 并通过数值计算得到了质心的可达工作空间。分析结果证明了研究方法的可行性以及采用这种新型关节的手臂的优越性。

1 新型拟人手臂的运动结构

1.1 Sarrus 结构

Sarrus 结构的 CAD 模型和分析简图见图 1。其中, 组成 Sarrus 结构的各单元是通过旋转副(铰链或者合页)连接的。事实上, 只要包含上下平台以及两个相邻的上下侧面就能组成一个完整的 Sarrus 结构。考虑到结构的稳定性及承载能力, 故采用了图 1a 的冗余结构。



(b) 分析简图
图 1 Sarrus 结构

对于 Sarrus 结构来说, 组成单元尺寸不同, 则其运动性能也稍有不同。在该手臂中, 假设组成 Sarrus 结构的每个单元完全一样, 且尺寸为 $a \times a \times b$ (长×宽×高)。由其结构特点可知

$$\alpha = \eta \quad \alpha + \beta + \eta = 360^\circ \quad 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \quad (1)$$

取 $z=z_0$ 平面的结构进行分析, 以角度 α 为变量 (Sarrus 结构自由度为 1), 则有 DC 上任一点 ($X=x_i$) 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = x_i \\ Y = 2a \sin \alpha \\ Z = z_0 \end{cases} \quad (2)$$

BC 的中点 E 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = a(1 - 0.5 \cos \alpha) \\ Y = 1.5a \sin \alpha \\ Z = z_0 \end{cases} \quad (3)$$

AB 则绕 A 点做旋转运动。即 B 点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = -a \cos \alpha \\ Y = a \sin \alpha \\ Z = z_0 \end{cases} \quad (4)$$

分析式(2)~(4), 得出以下结论: 假设下平台固定不动, 则 Sarrus 结构的上平台只能做上下往复直线运动; 下侧面只能绕着它与下平台之间的铰链做有限旋转运动(旋转角度为 90°); 而上侧面既随上平台移动、又绕其转动的复合运动。

1.2 5 自由度拟人手臂的运动结构

图 2 为拟人手臂模型。该手臂是由两个连杆(不包括肩部)和两个 Sarrus 关节通过三个旋转关节、一个固定关节连接而成的。它的运动副可视为三个旋转关节、一个固定关节和两个 Sarrus 关节。其中, 旋转关节自由度为 1, 固定关节自由度为 0, Sarrus 关节自由度为 1。通过计算可知, 该机器人拟人手臂的自由度为 5。

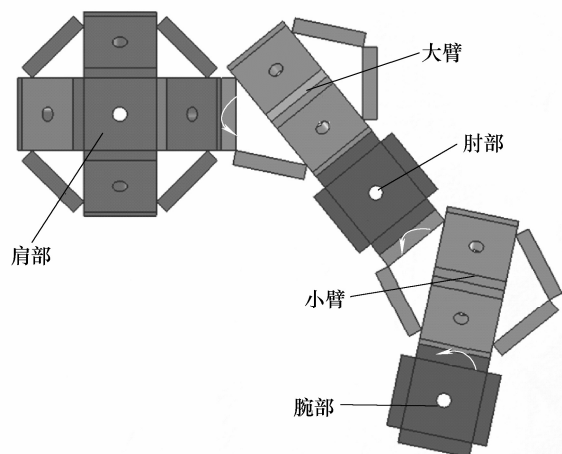


图 2 采用新型关节的机器人拟人手臂模型

对于该拟人手臂来说, 通过肩部旋转关节, 可以实现整个手臂的 360° 旋转运动; 通过大臂, 即第一个 Sarrus 关节, 可以实现大臂以下部位的弯曲和平移运动, 并能够改变手臂的工作空间; 通过肘部的旋转关节, 可以实现小臂及以下部位的 360° 旋转运动; 通过小臂, 即第二个 Sarrus 关节, 可以实现小臂以下部位的弯曲和平移运动, 并能够进一步改变手臂的工作空间; 通过腕部关节可以实现手腕的

360° 旋转运动。可以看出, 该机器人拟人手臂的运动范围远远超过了人类手臂, 其工作空间能够得到极大的扩展。

对于整个手臂来说, 可以将肩部固定于机座或者其他机器人上, 也可以直接通过肩部旋转关节与机座或其他机器人连接。通过控制各运动关节的输入, 从而实现手臂特定的任务或作业。

2 拟人手臂的运动学分析

2.1 运动学建模

正向运动学分析是已知机构主动件的位姿, 求解机构输出件的位置和姿态的过程。由于本文关心的是拟人手臂手腕的空间轨迹, 即手臂的工作空间, 故只对正向运动学进行研究。

该拟人手臂是一个 5 自由度机构, 根据其自由度配置, 在机构上建立了 5 个坐标系统, 坐标系的配置见图 3。最终目标是确定手腕质心 M 在基准坐标系下的轨迹方程。并假设基准坐标系是位于肩部关节处的 $O_0x_0y_0z_0$ 坐标系。由于该机器人拟人手臂结构中既有串联部分, 又有并联部分。故对其的正向运动学分析不适宜用比较传统的 D-H 法进行, 本文采用一种比较通用的方法: 坐标变换法。即通过求解各个坐标系间的变换矩阵, 然后求出总的变换矩阵, 最后通过坐标变换求得手腕的姿态矩阵及其质心 M 点的轨迹方程。

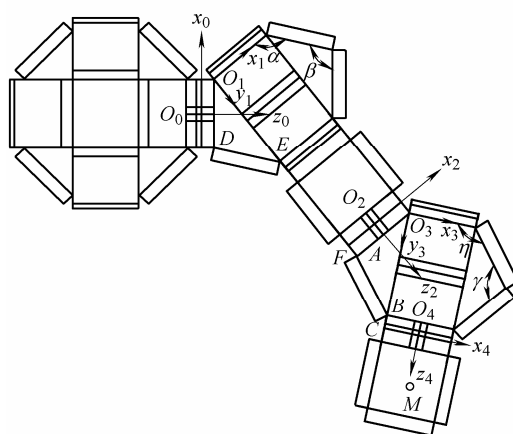


图 3 手臂的坐标系统配置

分析该手臂的变换过程包括平移变换和旋转变换。其中, 移动矢量为 $ai+bj+ck$ 时的平移齐次坐标变换矩阵为^[17]

$$\text{trans}(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

旋转齐次坐标变换矩阵对应于 x 轴、 y 轴和 z 轴作转角为 θ 的旋转变换有三种

$$\begin{aligned} \text{rot}(x, \theta) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{rot}(y, \theta) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{rot}(z, \theta) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\text{trans}()$ 表示平移变换; $\text{rot}()$ 表示旋转变换。为简化起见, 在下面的分析中, 用 T 表示 $\text{trans}()$; 用 R 表示 $\text{rot}()$ 。

由于该拟人手臂是由一种单元组成, 故各组成元素具有相同尺寸。对于图 3 中两个 Sarrus 关节, 则有如下关系成立

$$\begin{cases} 2\alpha + \beta = 360^\circ \\ 2\eta + \gamma = 360^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha, \eta \in [90^\circ, 180^\circ]$$

M 点在 $O_4x_4y_4z_4$ 坐标系下的轨迹表达式为

$${}^4\mathbf{p} = (0, 0, 0.5a + b, 1)^\top \quad (8)$$

为一常值。可见, 腕部的旋转关节对于 M 点的运动轨迹没有影响。

如图 3 所示, $O_4x_4y_4z_4$ 坐标系绕 y_3 轴旋转角度 $\varphi_1 \in [-180^\circ, 180^\circ]$, 使得 x_4 轴和 x_3 轴平行, 且方向相同。再绕旋转之后的 x_4 轴旋转 -90° , 再平移 ${}^3\mathbf{R}_{40}$, 即可得 $O_3x_3y_3z_3$ 坐标系。在这个过程中

$${}^3\mathbf{R}_{40} = \mathbf{l}_{O_3O_4} = \mathbf{l}_{O_3A} + \mathbf{l}_{AB} + \mathbf{l}_{BC} + \mathbf{l}_{CO_4} = 0.5a\mathbf{i} + (2a\sin\eta + b)\mathbf{j} \quad (9)$$

因此, 可以得到齐次变换矩阵

$${}^3\mathbf{T}_4 = T(0.5a, 2a\sin\eta + b, 0) \cdot R(y, \varphi_1) \cdot R(x, -90^\circ) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0.5a \\ 0 & 0 & 1 & 2a\sin\eta + b \\ -\sin \varphi_1 & -\cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

同样, 将 $O_3x_3y_3z_3$ 坐标系绕 z_2 轴旋转角度 $\varphi_2 \in [-180^\circ, 180^\circ]$, 使得 x_3 轴和 x_2 轴位于同一平面, 并沿着图 3 所示方向。再绕 y_2 旋转 $-(180^\circ - \eta)$, 再绕旋转之后的 x_2 轴旋转 90° , 再平移 ${}^2\mathbf{R}_{30}$, 即可得 $O_2x_2y_2z_2$ 坐标系。在这个过程中

$${}^2\mathbf{R}_{30} = \mathbf{l}_{O_2O_3} = 0.5a\mathbf{i} + b\mathbf{k} \quad (11)$$

所以, 齐次变换矩阵

$${}^2\mathbf{T}_3 = T(0.5a, 0, b) \cdot R(z, \varphi_2) \cdot R(y, -(180^\circ - \eta)) \cdot R(x, 90^\circ) = \begin{pmatrix} -\cos \eta \cos \varphi_2 & -\sin \eta \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0.5a \\ -\cos \eta \sin \varphi_2 & -\sin \eta \sin \varphi_2 & -\cos \varphi_2 & 0 \\ \sin \eta & -\cos \eta & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

将 $O_2x_2y_2z_2$ 坐标系绕 x_1 轴旋转 -90° , 从而与 $O_1x_1y_1z_1$ 坐标系具有相同方位, 再平移 ${}^1\mathbf{R}_{20}$, 即可得 $O_1x_1y_1z_1$ 坐标系。其中

$${}^1\mathbf{R}_{20} = \mathbf{l}_{O_1O_2} = \mathbf{l}_{O_1D} + \mathbf{l}_{DE} + \mathbf{l}_{EF} + \mathbf{l}_{FO_2} = 0.5a\mathbf{i} + (2a\sin\alpha + a + 3b)\mathbf{j} \quad (13)$$

故齐次变换矩阵

$${}^1\mathbf{T}_2 = T(0.5a, 2a\sin\alpha + a + 3b, 0) \cdot R(x, -90^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.5a \\ 0 & 0 & 1 & 2a\sin\alpha + a + 3b \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

同理, 将 $O_1x_1y_1z_1$ 坐标系绕 z_0 轴旋转角度 $\varphi_3 \in [-180^\circ, 180^\circ]$, 使得 x_1 轴和 x_0 轴位于同一平面, 再绕 y_0 轴旋转 $-(180^\circ - \alpha)$, 绕 x_0 旋转 90° , 再平移 ${}^0\mathbf{R}_{10}$ 即可得 $O_0x_0y_0z_0$ 坐标系, 其中

$${}^0\mathbf{R}_{10} = 0.5a\mathbf{i} + b\mathbf{k} \quad (15)$$

得到齐次变换矩阵

$${}^0\mathbf{T}_1 = T\left(\frac{1}{2}a, 0, b\right) \cdot R(z, \varphi_3) \cdot R(y, -(180^\circ - \alpha)) \cdot R(x, 90^\circ) = \begin{pmatrix} -\cos \alpha \cos \varphi_3 & -\sin \alpha \cos \varphi_3 & \sin \varphi_3 & 0.5a \\ -\cos \alpha \sin \varphi_3 & -\sin \alpha \sin \varphi_3 & -\cos \varphi_3 & 0 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

因此, 整个拟人手臂的齐次变换矩阵, 即手腕的姿态矩阵可写为

$${}^0\mathbf{T}_4 = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 \quad (17)$$

M 点在基准坐标系下的位置描述为

$${}^0\mathbf{p} = {}^0\mathbf{T}_4 {}^4\mathbf{p} \quad (18)$$

由式(17)、(18)可知, 虽然腕部关节对手腕质心的位置没有影响, 但会影响手腕的姿态。

2.2 工作空间分析

基于上述运动学分析得到的手腕质心在基准坐标系下的轨迹方程式(18), 用 Matlab 编程绘制手腕质心 M 在基准坐标系下的工作空间, 即 M 在 $O_0x_0y_0z_0$ 坐标系下的轨迹曲线^[18], 绘制的曲线如图 4 所示(此算例中, 每个单元的尺寸为 $30\text{ m} \times 30\text{ m} \times 6\text{ m}$; 暂不考虑由于 Sarrus 结构自身形状的变化而造成的空间运动干涉)。

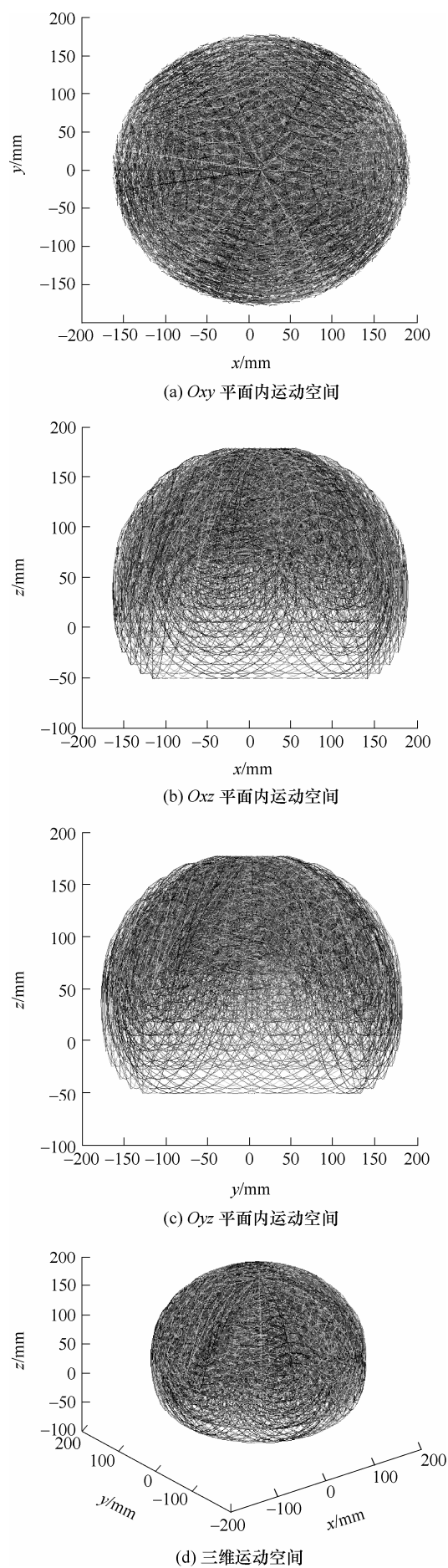


图4 拟人手臂手腕质心在基准坐标系下工作空间

由图4a可知,该拟人手臂在任何垂直于 z 轴的平面上的工作空间是完全对称的,这主要是因为整个肩部以下的部分能绕 O_0 点作全圆周运动而没有任何干扰,因此其轨迹域是由一系列平行于 $O_0x_0y_0$ 平面的圆形面域组成,由此也可知该拟人手臂具有非常大范围的工作空间。

从图4b、4c可以看出,手腕能够实现前后运动,即其在 z 轴的负方向也能达到一定范围,这与真实的手臂类似,表明其能够模拟真实手臂的运动功能。

由图4所示的拟人手臂工作空间可知,假设不考虑肩部以上的刚性部分,当该拟人手臂的Sarrus关节完全收缩时,整个手臂在 z 轴方向上的长度为108 mm,而手腕的末端面能够达到的范围为 $-71 \sim 200$ mm。同样地,当受到压缩时,手腕质心 M 在 x 和 y 轴方向上的位置可以到零,而且其实际的工作空间能够达到 $-175 \sim 175$ mm。

由此可见,若不采用这种Sarrus关节,要达到同样的工作空间,则至少要在 z 轴方向上增加一个运动位移范围为163 mm的移动副,同时要在 x 和 y 轴方向上增加运动位移范围为350 mm的移动副。这样,不仅增加了手臂的总体尺寸和生产成本,限制了适用范围,还大大增加了控制难度。

综上所述,这种采用Sarrus结构作为运动关节的新型拟人手臂能够利用自身结构的特殊性与优势,突破结构限制,从而延伸其工作空间,并且基于Sarrus结构拟人手臂的机器人特别适合于在小空间内进行大范围运动的作业。这种拟人手臂不仅能当作一般工业机器人使用,还可配合移动机器人开展侦查、探测、援救、搬运等任务。且由于其结构简单,制造和装配都比较方便,成本低,可以针对不同的需求进行重构,适合用于未知领域的探测。

3 结论

(1) 提出并设计了一种采用Sarrus结构作为运动关节的5自由度新型手臂,并通过自由度分析和运动机理分析对该拟人手臂的结构与运动副进行了研究。

(2) 利用坐标变换方法对该手臂进行运动学建模,得到手腕姿态矩阵及手腕质心在基准坐标系下轨迹方程,并通过计算绘制出腕部质心在运动范围内的轨迹曲线。

(3) 通过分析可以发现,利用Sarrus结构的特殊性,该手臂可以克服自身结构尺寸的限制,通过改变构型,达到更广的工作空间,减小整体尺寸,适用范围更广。

参 考 文 献

- [1] FREDRIK L, ERIK J, MICHAEL F. Simultaneously learning to recognize and control a low-cost robotic arm[J]. Image and Computing, 2009, 27: 1729-1739.
- [2] ZHENG Y, JIANZHONG S, NAN C, et al. A method for path planning of hydraulic manipulator[C]//International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, April 11-12, Zhangjiajie, China. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009, 2: 8-12.
- [3] JOHN R R, Low-cost teleoperable robotic arm[J]. Mechatronics, 2009, 19: 774-779.
- [4] 杨政, 尚建忠, 王彪, 等. 液压驱动机械臂的轨迹规划[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 47-51.
YANG Zheng, SHANG Jianzhong, WANG Biao, et al. Study on trajectory planning for hydraulic-drive manipulator[J]. Machine Design and Research, 2009, 25(2): 47-51.
- [5] WANG Yueling, JIN Zhenlin. Dynamics modeling and robust trajectory tracking control for a class of hybrid humanoid arm based on neural network[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(3): 355-363.
- [6] GUAN Yisheng, JIANG Li, ZHANG Xianmin, et al. 1-DOF joint modules and their applications in new robotic systems[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Feb. 21-26, Bangkok, Thailand. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 1905-1910.
- [7] MARK L G, MICHAEL D N. Design of a novel 3 degree of freedom robotic joint[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct. 11-15, Louis, US. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 5146-5152.
- [8] ELIE S, ALON W, HOWIE C. Three degrees-of-freedom joint for spatial hyper-redundant robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41: 170-190.
- [9] 刘海涛, 黄田, CHETWYND D G, 等. 5 自由度大工作空间/支链行程比混联机械手的概念设计与尺度综合[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 14-20.
LIU Haitao, HUANG Tian CHETWYND D G, et al. Kinematic design of 5-DOF hybrid robot with large workspace/limb-stroke ratio[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 14-20.
- [10] JIN Zhenlin, GAO Feng. Novel 6-SPS parallel 3-dimensional platform manipulator and its force/motion transmission analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(4): 298-302.
- [11] RANJANA S, SRINATH A, RICHARD G, et al. Towards a 3g crawling robot through the integration of microrobot technologies[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 15-19, Orlando, Florida. Piscataway: IEEE Inc., 2006: 296-302.
- [12] GAVIN D K, LUIS R. Biologically inspired telescoping active suspension arm vehicle: Preliminary results[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 6-9, Montréal, Canada. Piscataway: IEEE Inc., 2010, 1380-1384.
- [13] KATIE L H, ROBERT J W. Myriapod-like ambulation of a segmented micro robot[J]. Auton. Robot, 2011: 103-114.
- [14] 陆震, 杨光, 王启明, 等. FAST 望远镜主动反射面促动机构运动学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 233-238.
LU Zhen, YANG Guang, WANG Qiming, et al. Research on mechanism of actuated active reflectors for FAST[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 233-238.
- [15] 陈红亮, 罗玉峰, 杨廷力. 对称三自由度并联机器人拓扑结构型综合与分类[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 138-141.
CHEN Hongliang, LUO Yufeng, YANG Tingli. Structure design sort of parallel robot mechanism with symmetric 3-DOF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 138-141.
- [16] ZHANG Yitong, MU Dejun. New concept and new theory of mobility calculation for multi-loop mechanisms[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(6): 1598-1604.
- [17] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
CAI Zixing. Robotics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [18] MICHAEL B, JOHN M H, TIMOTHY L J, et al. Robot motion: Planning and control[M]. Cambridge: MIT Press, 1982.

作者简介: 廖波, 男, 1987 年出生。主要研究方向为智能机械与数字化设计。

E-mail: xzhshgm@126.com

尚建忠(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械设计及理论、智能机械与数字化设计、精密装配。

E-mail: jianzhongshang@gmail.com

ERNEST Appleton, 男, 1944 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机器人、工业制造自动化。

E-mail: ernest.appleton@o2.co.uk

杨政, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电系统动力学、智能机械与数字化设计、装配控制等。

E-mail: iamyangzheng@gmail.com