

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.001

伤员转运机器人自平衡系统的运动学研究

李茂生, 张春燕*, 刘香玉, 宛宇

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了提高复杂突变环境中伤员的救援效率和成功率,提出一种具有3R1T的4-UPS/PS并联机构作为伤员转运机器人的自平衡系统。利用螺旋理论对自由度进行分析并通过修正的G-K公式进行检验;采用封闭矢量法求得各杆长与动平台位姿间的关系;建立数值解方程,采用牛顿迭代法求解位置正解,利用数值验证正解的精度。通过ADAMS仿真软件对自平衡器的平衡过程进行运动性能仿真分析。实验结果表明机构运动性能优越,驱动性能良好,具有很强的可控性和稳定性,适用于救援转运机器人。

关键词:转运机器人;自平衡;自由度;修正G-K公式;封闭矢量法;牛顿迭代法

中图分类号:TP242.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0001-06

Kinematics Analysis of Self-Balancing System for Wounded-Transfer Robot

LI Maosheng, ZHANG Chunyan*, LIU Xiangyu, WAN Yu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of rescuing the wounded in the complex and catastrophic environment, a novel parallel mechanism with 3R1T was proposed, which could be used in self-balancing system of the transfer robot. The degree of freedom was analyzed by using screw theory and tested by the modified G-K formula. By utilizing the closed vector, the solution to the inverse kinematics and the relation between the length of each driving rod and the posture of the moving platform were obtained. The numerical solution equation of the self-balancing system was established, and Newton iteration method was used to solve the position kinematics solution. The balancing process of the self-balancing was simulated by ADAMS and motion performance was analyzed. The experimental results show that the self-adjustment of the self-balancing system can achieve the balance of the fixed platform of the mobile robot casualties, and the mechanism has excellent motion performance, good drive performance, strong controllability and stability, which is suitable for the rescue and transport robots.

Keywords: wounded-transfer robot; self-balancing; freedom degree; modified G-K formula; closed vector method; Newton iteration method

救援机器人在地震、火灾、矿难及核污染等危险环境中能够代替人类进行救援工作^[1]。近年来美国、德国和日本等国家已开始将机器人应用到地震、泥石流和大型建筑物坍塌的抢险救援中^[2-6]。灾难发生时,通常救护车无法直接到达伤员所在地点,需要相应的搬运工具将伤员抬到指定地点才能进一步施救。但是遭

到破坏的路面,湿滑、崎岖不平。救援时会面临多种复杂的路面情况,如狭窄通道、凹凸不平的路面、陡坡等,伤员转运工作速度慢、劳动强度大,更易给伤员带来二次伤害。因此设计一种具有良好的越障性、稳定性和自平衡性的移动承载型机器人对于灾难救援具有重要意义。

收稿日期:2018-11-30;修回日期:2019-03-12

基金项目:上海市研究生科研创新项目基金资助(18KY0122)。

第一作者简介:李茂生(1995),男,江苏邳州人,硕士研究生,主要研究方向为机器人机构设计。通信作者:张春燕(1980),女,安徽淮北人,博士研究生,副教授,主要研究方向为CAD/CAM机电一体化及机器人机构设计。E-mail:keke204102@163.com

美国 Vecna 医疗设备公司为军方研制的一种战后救援机器人“BEAR”^[7],通过两个执行臂将伤员“抱起”并固定。日本三菱公司研究出伤员搬运机器人“RI-MAN”^[8],通过仿生机械手臂完成对伤员的“抱起”动作,并实现伤员搬离、转运等工作。靳飞等^[9]研制出一款在复杂环境中确保伤员保持平躺的转运机器人,采用连杆机构利用倾角传感器测得担架倾斜角度并通过单片机控制电动推杆动作,确保伤员保持姿态平衡。许新^[10]研制出一种用于陡坡台阶的伤员转运机器人,采用履带轮架结构、上下层可分离结构并配有便携式急救设备。吴俊^[11]提出一种基于多平衡机构耦合模型的全方位自平衡系统,通过固定平台上的电推杆支撑自平衡机构来调节顶端担架床体姿态平衡。

机器人“抱起”的动作易导致伤员身体各部位之间的挤压,造成二次伤害^[12-13];并且目前的转运机器人,主要以担架床体为主体,利用剪裁、电推杆和三角支撑等技术来调节担架床体的位姿,将伤员转运出灾难现场。但其转运的动力主要依靠人,长时间工作,会出现支撑稳定性不佳、动力持续时间不足等问题。故笔者提出一种基于 3R1T 并联机构的自平衡伤员转平台来解决上述问题。

1 机构描述

如图 1 所示,自平衡移动承载型救援机器人由三部分组成:全方位移动平台、自平衡补偿系统和伤员固定平台。为保证伤员固定平台在复杂的地面环境保持平衡,自平衡补偿系统需要具有 x, y, z 共 3 个方向的转动和 z 轴方向的移动。因此选择 3R1T 并联机构作为自平衡补偿系统的执行器。执行器的固定平台固定在全方位移动平台上,运动平台与伤员固定平台相连。全方位移动平台是救援机器人的移动平台,因此采用牵引力大、地形适应能力强的履带。移动平台移动时的越障依靠履带,而伤员固定平台的自平衡就要靠 3R1T 并联机构的自我调节。笔者主要针对自平衡补偿系统的运动学做分析。

如图 2 所示,自平衡转运机器人的自平衡补偿系统的执行器包含 1 个动平台 B 和 1 个固定平台 A ,通过 4 条完全相同的 UPS 驱动支链以及中间 1 条被动支链 PS 连接。每一条驱动支链的一端通过虎克铰(U 铰),另一端通过球铰(S 铰)。移动副(P 副)通过虎克铰和球铰中心将上下平台连接。中间被动支链的底端连接在固定平台的中心,顶端通过球铰连接在动平台的中心。 $A_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示第 i 条支链的虎克铰中心, $B_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示第 i 条支链的球铰的中心。

A_1, A_2, A_3, A_4 构成一个半径为 R 的圆, B_1, B_2, B_3, B_4 构成一个半径为 r 的圆。选取 UPS 中的移动副 P 作为驱动副。在固定平台以及动平台中分别建立固定坐标系 $\{o\}$ 以及运动坐标系 $\{o'\}$,各铰点坐标如表 1 所示。定坐标系 $\{o\}$ 和动坐标系 $\{o'\}$ 的初始方位重合且动平台与固定平台的中心共线且相对高度为 h_0 。

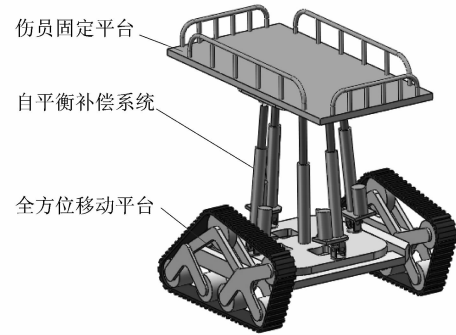


图 1 自平衡转运机器人

Figure 1 Wounded-transfer robot with self-balancing

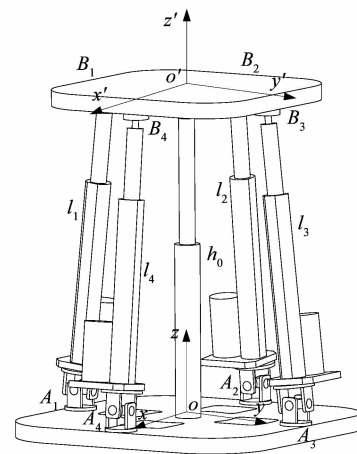


图 2 4-UPS/PS 并联机构

Figure 2 4-UPS/PS parallel manipulator

表 1 各铰点初始状态的坐标

Table 1 Coordinate in initial state of hinge points

i	坐标系 $\{O\}$ 的铰点 A_i 坐标	坐标系 $\{O'\}$ 的球铰 B_i 坐标
1	$(0, -R, 0)$	$(0, -r, 0)$
2	$(-R, 0, 0)$	$(-r, 0, 0)$
3	$(0, R, 0)$	$(0, r, 0)$
4	$(R, 0, 0)$	$(r, 0, 0)$

2 自由度分析

为了验证 4-UPS/PS 并联机构是否具有 3R1T 共 4 个自由度,采用螺旋理论^{[14]2-24}对机构进行自由度分析。根据文献[15]可知 4 条 UPS 支链对动平台不提供约束螺旋,故仅需要考虑中间被动支链对于动平台提供的约束。如图 3 所示,建立从动支链螺旋系,取坐标系 $\{o_0\}$

的坐标原点与球铰的中心点相重合, z_0 沿着中间支链的连杆方向向上, 其余 2 个转动方向分别为 x_0, y_0 。

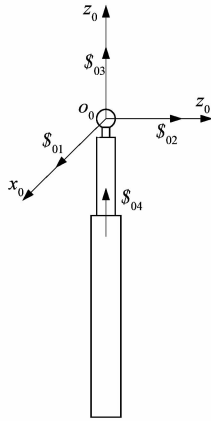


图3 PS从动支链螺旋坐标系

Figure 3 Modeling of screws of passive PS-type limbs

对 PS 从动支链求解其运动螺旋系得

$$\begin{cases} \$_{01} = (1 & 0 & 0 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_{02} = (0 & 1 & 0 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_{03} = (0 & 0 & 1 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_{04} = (0 & 0 & 0 & ; & 0 & 0 & 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\$_{01}, \$_{02}, \$_{03}, \$_{04}$ 表示从动支链运动副的螺旋。

对式(1)求解反螺旋, 得到其约束螺旋系:

$$\begin{cases} \$_{01}^r = (1 & 0 & 0 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_{02}^r = (0 & 1 & 0 & ; & 0 & 0 & 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\$_{01}^r, \$_{02}^r$ 表示从动支链的约束螺旋。

因此, 4-UPS/PS 并联机构的约束螺旋系为:

$$\begin{cases} \$_1^r = (1 & 0 & 0 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_2^r = (0 & 1 & 0 & ; & 0 & 0 & 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\$_1^r, \$_2^r$ 表示并联机构的约束螺旋。

对式(3)求解反螺旋可以得到平台的运动螺旋系:

$$\begin{cases} \$_1^m = (1 & 0 & 0 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_2^m = (0 & 1 & 0 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_3^m = (0 & 0 & 1 & ; & 0 & 0 & 0); \\ \$_4^m = (0 & 0 & 0 & ; & 0 & 0 & 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(r(\cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \sin \alpha))^2 + (r(\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha) - R)^2 + (r \cos \beta \sin \alpha - z)^2]^{1/2} \\ [(R - r \cos \gamma \cos \beta)^2 + (r \sin \gamma \cos \beta)^2 + (r \sin \beta + z)^2]^{1/2} \\ [(r(\cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \sin \alpha))^2 + (R - r(\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha))^2 + (r \cos \gamma \sin \alpha + z)^2]^{1/2} \\ [(r \cos \gamma \cos \beta - R)^2 + (r \sin \gamma \cos \beta)^2 + (r \sin \beta - z)^2]^{1/2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(4)中的第 1, 2, 3 个螺旋分别表示动平台有一个绕着 x, y, z 轴转动的自由度, 第 4 个螺旋表示动平台有一个沿 z 轴移动的自由度。显然, 机构不存在公共约束, 也不存在冗余约束。采用 G-K 公式^{[14]112-116}即:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v. \quad (5)$$

式中: M 表示机构的自由度; $d = 6 - \lambda$ 表示机构的阶数, λ 表示公共约束; n 表示连杆的数目; g 表示运动副的数目; f_i 表示第 i 个自由度; v 表示并联机构的冗余约束。

所以, 机构的自由度根据 G-K 公式可得:

$$M = 6(11 - 14 - 1) + 28 = 4.$$

3 运动学分析

3.1 位置逆解

已知 4-PUS/PS 并联机构的尺寸参数和末端点 o 的位置矢量 $\mathbf{P} = (x, y, z)^T$, 借助旋转矩阵确定机构的关节位置, 求解分支中 P 副的杆长 $l_i (i = 1 \sim 4)$ 。运动坐标系 $\{o'\}$ 相对于固定坐标系 $\{o\}$ 的姿态变换矩阵可以表示为:

$$\mathbf{B}_{oi} = \mathbf{R}_o^o \mathbf{B}_i + \mathbf{P}. \quad (6)$$

由于并联机构只有沿着 z 轴的移动, 所以

$$\mathbf{P} = (0, 0, z).$$

$$\mathbf{R}_o^o = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}.$$

式中: α, β, γ 分别表示动平台中心在动坐标系中的转动角度。

根据封闭矢量法, 建立如图 4 所示的 4-UPS/PS 并联机构的封闭矢量图。设 $\mathbf{a}_i$ 为虎克铰中心在固定平台坐标系中的单位矢量; $\mathbf{b}_i$ 为球铰中心在动坐标系中的单位矢量; $\mathbf{u}_i$ 为驱动副运动方向的单位矢量; $\mathbf{p}$ 为动坐标系原点在固定平台坐标系中的矢量; l_i 为第 i 根杆的驱动杆的长度。由此构建封闭矢量方程:

$$l_i \mathbf{u}_i = \mathbf{R}_o^o \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i + \mathbf{p}. \quad (7)$$

机构的逆解为:

$$l_i = \sqrt{(\mathbf{R}_o^o \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i + \mathbf{p})^T (\mathbf{R}_o^o \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i + \mathbf{p})}. \quad (8)$$

将各点值代入式(8)可得机构逆解:

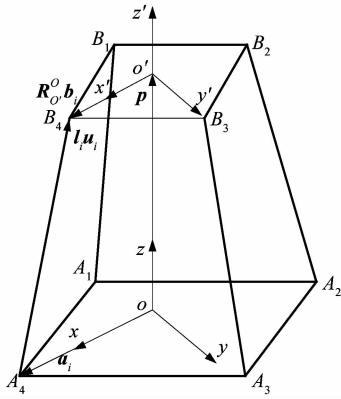


图4 4-UPS/PS 并联机构的封闭矢量图

Figure 4 Closed vector diagram of
4-UPS/PS parallel manipulator

3.2 运动学正解

由于并联机构的结构复杂,位置正解的难度比较大。通常位置正解的方法主要采用数值法和解析法。笔者采用牛顿迭代法对4-UPS/PS 并联机构的正解进行求解。

建立驱动杆 l_i 长度的非线性方程:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\alpha, \beta, \gamma, z) &= l_1^2 - (R_o^o b_1 - a_1 + p)^T (R_o^o b_1 - a_1 + p) = 0; \\ f_2(\alpha, \beta, \gamma, z) &= l_2^2 - (R_o^o b_2 - a_2 + p)^T (R_o^o b_2 - a_2 + p) = 0; \\ f_3(\alpha, \beta, \gamma, z) &= l_3^2 - (R_o^o b_3 - a_3 + p)^T (R_o^o b_3 - a_3 + p) = 0; \\ f_4(\alpha, \beta, \gamma, z) &= l_4^2 - (R_o^o b_4 - a_4 + p)^T (R_o^o b_4 - a_4 + p) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

设 $x = [\alpha, \beta, \gamma, z]^T$, 式(10)化简为:

$$f_i(x) = l_i^2 - (R_o^o b_i - a_i + p)^T (R_o^o b_i - a_i + p) = 0. \quad (11)$$

式中: $\alpha = \theta_x, \beta = \theta_y, \gamma = \theta_z$; $f_i(x)$ 表示第 i 个杆的杆长。

取式(11)的理论解为:

$$x^* = [\theta_x^*, \theta_y^*, \theta_z^*, z^*]^T.$$

式中: $\theta_x^*, \theta_y^*, \theta_z^*, z^*$ 分别表示 α, β, γ, z 的理论解。

设 $x_k = [\theta_k, \theta_k, \theta_k, z_k]^T$ 为非线性方程组(10)的初值; δ 为误差矢量, $\delta = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4]^T$ 。则

$$x^* = x_k + \delta.$$

式中: $\theta_k, \theta_k, \theta_k, z_k$ 分别表示动平台的位姿, 即 α, β, γ, z 迭代开始时的值; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 分别表示迭代后实际解与理论值的误差。

利用泰勒级数将式(11)展开并化简可得:

$$f_i(x_k + \delta) = f_i(x_k) + \frac{\partial f_i}{\partial \theta_x} \delta_1 + \frac{\partial f_i}{\partial \theta_y} \delta_2 + \frac{\partial f_i}{\partial \theta_z} \delta_3 + \frac{\partial f_i}{\partial z} \delta_4. \quad (12)$$

当 $f_i(x_k + \delta) = f_i(x^*) = 0$ 时, 可得:

$$J\delta = -f. \quad (13)$$

联立式(10)~式(12)3个约束方程, 可以得到关于越障角度和驱动杆的杆长的约束方程:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\theta_x, \theta_y, \theta_z, z, l_1) &= 0; \\ f_2(\theta_x, \theta_y, \theta_z, z, l_2) &= 0; \\ f_3(\theta_x, \theta_y, \theta_z, z, l_3) &= 0; \\ f_4(\theta_x, \theta_y, \theta_z, z, l_4) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

此时, 运动学正解就变成已知驱动杆的长度 l_i 求解非线性方程组的解的问题。用牛顿迭代法求解出式(14)的近似解 $(\alpha, \beta, \gamma, z)$ 就是4-UPS/PS 并联机构的正解。

3.3 Jacobian 矩阵分析

速度雅可比矩阵表示驱动杆件与末端速度的一种映射关系。连接动平台和固定平台的4条支链的移动副作为广义输入 $l = (l_1, l_2, l_3, l_4)^T$, 动平台的广义输出表示为 $V = (\omega, v) = (\alpha, \beta, \gamma, z)^T$, 移动副的广义上输入速度为 $\dot{l} = (\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4)^T$, 动平台末端的广义输出速度:

$$\dot{V} = (\dot{\omega}, \dot{v}) = (\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{z})^T. \quad (15)$$

将式(7)两端对时间求导:

$$\dot{l}_i = \frac{\dot{l}_i}{l_i} v_{B_i} = q_i v_{B_i}. \quad (16)$$

式中: v_{B_i} 表示动平台上的铰点 B_i 的速度; $\dot{l}_i$ 表示运动支链在2个铰点之间的向量; l_i 表示第 i 个驱动杆的长度; q_i 表示沿 l_i 的单位向量。

对于动平台的末端速度 V 进行求解:

$$v_{B_i} = v + \omega \times B_i. \quad (17)$$

式中: v 表示动平台中心的平动速度; ω 表示动平台中心的角速度。

把式(16)代入式(15)得:

$$\dot{l}_i = q_i v + (q_i \times B_i) \omega. \quad (18)$$

故由此可得4-UPS/PS 并联机构的关节速度与末端速度的映射关系:

$$\dot{l}_i = J \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (19)$$

$$\text{式中: } J = \begin{bmatrix} q_1^T & (q_1 \times B_1)^T \\ q_2^T & (q_2 \times B_2)^T \\ q_3^T & (q_3 \times B_3)^T \\ q_4^T & (q_4 \times B_4)^T \end{bmatrix}, \text{ 表示机构的雅可比矩阵。}$$

4 数值算例与仿真分析

4.1 数值算例

为验证自动补偿系统的自我调节能力, 通过数值

模拟来验证机构动平台的正解。取图2中机构各参数如下:动平台的外接圆半径 $r = 300$ mm,固定平台的外接圆半径 $R = 400$ mm, $h_0 = 800$ mm,驱动支链缸体的长度 $l' = 600$ mm,驱动杆的长度 $l'' = 400$ mm,从动支链可动部分的长度 $l_0 = 600$ mm,当 $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ, \gamma = 0^\circ, z = 800$ mm 和 $\alpha = 15^\circ, \beta = 15^\circ, \gamma = 0^\circ, z = 800$ mm 时分别计算出表2中所示的第1,2组各个驱动杆的长度 l_i ;再任意给定两组杆长,得到表2中的第3,4组数据。然后利用表2中各杆长 l_i 进行牛顿迭代得出表3所示的机器人补偿系统相应的位姿。

表2 驱动杆长输入

Table 2 Input of drive rod length

序号	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	l_4/mm
1	807.80	807.80	807.80	807.80
2	681.33	681.33	755.64	755.64
3	764.32	712.70	767.32	819.82
4	805.10	748.67	805.10	915.39

表3 系统补偿位姿输出

Table 3 Output of system compensation pose

序号	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	z/mm
1	0.02	0.01	0.02	800.02
2	14.99	15.03	0.03	800.01
3	11.41	0.02	21.22	823.02
4	0.02	16.34	0.01	798.03

根据表3中的数据可知采用牛顿迭代法得出的补偿位姿, α 的最大误差为 0.02° , β 和 γ 的最大误差为 0.03° , z 最大误差为 0.01 mm。所以利用牛顿迭代法求解出来的补偿位姿的精度,完全可以满足自平衡补偿系统的自我平衡的要求。

4.2 虚拟样机

为了对4-UPS/PS机构自平衡性能评估,利用SolidWorks建立如图5所示的三维模型并导入ADAMS中进行仿真。根据GB/T 7031—2005《机械振动 道路路面谱测量数据报告》中的描述,笔者将救援机器人在经过爬坡、翻越台阶及凹凸不平地面等工作环境动平台的输出规律定义为正弦函数。选取机器人在凹凸不平地面上行驶的情况对机构的自平衡补偿学性能进行分析,运动规律如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 10^\circ \sin 0.2\pi t; \\ \beta &= 15^\circ \sin 0.2\pi t; \\ \gamma &= 5^\circ \sin 0.2\pi t; \\ z &= 5t. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

通过ADAMS仿真得到4根驱动杆在20 s内动平台的耦合运动。驱动杆质心的速度以及位移变化和驱

动杆的速度变化如图6和图7所示。

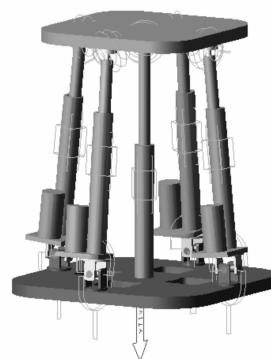


图5 4-UPS/PS 并联机构虚拟样机模型

Figure 5 Virtual prototype model of 4-UPS/PS parallel manipulator

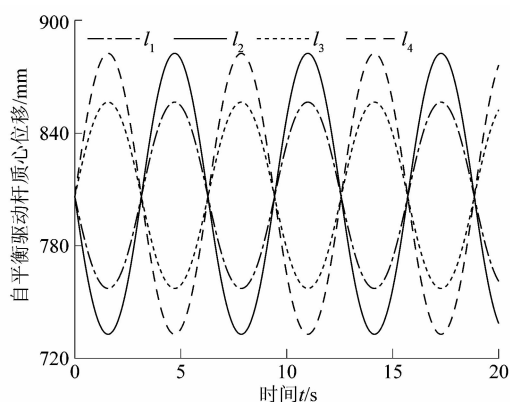


图6 自平衡驱动杆位移仿真曲线

Figure 6 Simulation curve of displacement of self-balancing driving rod

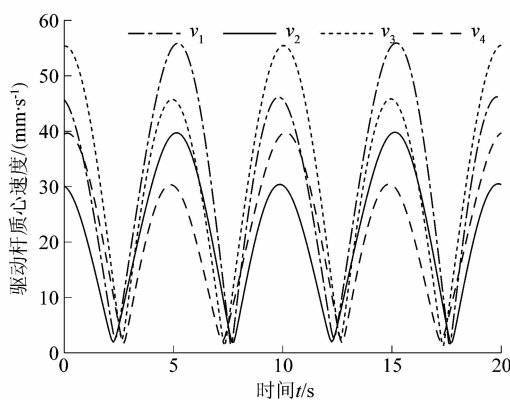


图7 自平衡驱动杆质心速度变化仿真曲线

Figure 7 Simulation curve of velocity change in center of mass of self-balancing driving rod

根据运动学分析与 Jacobian 矩阵分析,运用MATLAB数值分析软件对驱动杆的长度和速度进行求解,其结果如图8和图9所示。

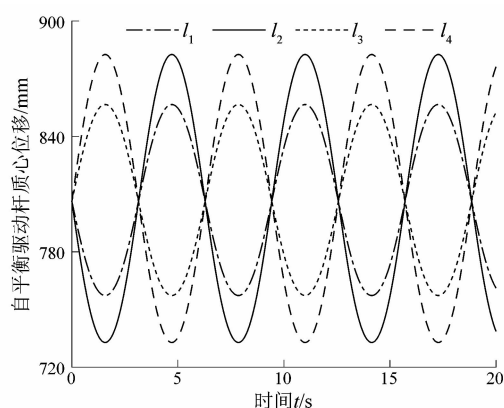


图8 自平衡驱动杆位移计算曲线

Figure 8 Calculation curve of displacement of self-balancing driving rod

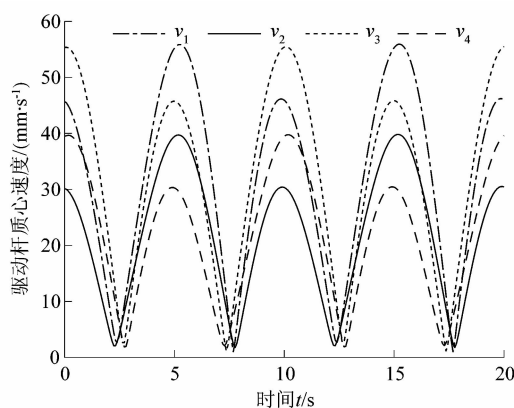


图9 自平衡驱动杆速度计算曲线

Figure 9 Calculation curve of self-balancing drive rod speed

通过对比图6与图8,图7与图9的曲线可看出,4杆的变化位移整体保持一致,ADAMS软件仿真出的运动学结果验证了理论分析是正确的。而且从图6与图8的驱动杆长度变化曲线中可以看出,曲线较为平缓,没有出现突变点。由此可以看出4-UPS/PS运动性能优越,驱动性能良好,具有很强的可控性和稳定性。图7和图9的速度变化曲线中可以看出,各个驱动杆具有良好的同步性,运动曲线比较平滑,没有速度突变,曲线并未出现断点等冲击现象指标,驱动性和可控性较强,具有良好的稳定性,不会发生速度突变,失去控制而对伤员造成二次伤害。

5 结论

1) 笔者提出一种新型的3R1T并联机构应用于灾难救援的自平衡移动转运机器人,目的是为了提高自平衡补偿系统的稳定性和承载能力,提高救援运输的效率。

2) 利用螺旋理论对4-UPS/PS并联机构的自由度进行计算,得到机构具有3R1T共4个自由度,验证了机构能满足自平衡的设计需求。

3) 建立该机构封闭矢量图,推导出该机构的运动学逆解,并得出对应杆位移。采用牛顿数值迭代法得到机构运动学正解,用实际结果验证正解。依据正解初始输入值对设备进行调试, α 的最大误差为 0.02° , β 和 γ 的最大误差为 0.03° , z 最大误差为 0.01 mm ,可满足自平衡系统的要求。

4) 课题组通过将MATLAB的计算结果与ADAMS仿真结果对比,得到4-UPS/PS并联机构作为自平衡补偿元件具有良好的结构对称性,速度曲线平滑无突变所以具有良好的运动性能而且便于控制,能满足伤员运输的要求,可以避免伤员受到二次伤害。

参考文献:

- [1] 宋和平,程洪海,杨华. 战伤时效救治原则对伤员医疗后送的要求[J]. 武警医学院学报,2008,17(3):233-235.
- [2] MATSUNO F, KAMEGAWA T, SATO N, et al. Rescue robot systems - development of high-functionality multiple robot system and robust/scalable information infrastructure - [C]// Advanced Robotics & Its Social Impacts. Seoul, South Korea: IEEE, 2010: 87-91.
- [3] 董晓坡,王绪本. 救援机器人的发展及其在灾害救援中的应用[J]. 防灾减灾工程学报,2007,27(1):112-117.
- [4] 彭宽栋,张学良,郑龙,等. 自适应履带机器人的研究与测试[J]. 机电工程,2017,34(12):1485-1490.
- [5] HABIB M K, BAUDOUIN Y, NAGATA F. Robotics for rescue and risky intervention [C]//37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, Australia: IEEE, 2011: 3305-3310.
- [6] HASHINO S. Review of transfer system for the handicapped [J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 1993, 11(5): 49-54.
- [7] 陈宗伦. 美军战地救护机器人将出设火线营救伤员[EB/OL]. (2010-11-26) [2018-11-30]. <http://news.163.com/10/1129/16/6MM1U29P00014JB6.html>.
- [8] 武爱华. 一种全方位护理服务机器人的结构设计与运动学分析[D]. 天津:天津工业大学,2016:5.
- [9] 靳飞,韩晓伟,李敬一,等. 可拆卸自平衡担架床的研究与设计[J]. 机械设计与制造,2013(2):69-73.
- [10] 许新. 下楼梯越障担架车设计[D]. 济南:山东大学,2014:22-47.
- [11] 吴俊. 伤员自平衡转运机器人设计与研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017:16-18.
- [12] 王兆星,董福慧. 正常人的软组织张力测定[J]. 中国骨伤,2004,17(1):13-15.
- [13] 李炜,屈树新,周仲荣. 不同年龄、性别和解剖部位人体皮肤摩擦特性的研究[J]. 生物医学工程学杂志,2007,24(4):824-828.
- [14] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社,2014.
- [15] 赵云峰,程丽,赵永生. 3-UPS/S并联机构运动学分析及机构优化设计[J]. 机械设计,2009,26(1):46-49.