

# 一种新型拟人机械腿的运动传递性能分析\*

计时鸣, 刘毅, 李研彪, 李景敏

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032)

**摘要:** 针对当前多数拟人机械腿采用串联机构出现的运动惯性大、承载能力小,不能很好地满足拟人机器人运动特性需要的问题,提出了一种新型拟人机械腿并联机构,介绍了其结构布局特点,该机构具有3个自由度,外观匀称,与人腿相仿度高,在结构上实现了人体踝关节和膝关节功能。建立了该并联机械腿的位置反解方程,基于该方程用矢量法推导出了线速度和角速度雅可比矩阵,分别定义两矩阵的条件数和可操作度作为其运动学性能指标,分析了各性能指标在工作空间内的分布规律。研究结果表明:拟人机械腿速度传递性能良好且稳定,脚掌的运动传递性能几乎不受屈膝角度的影响。仿真结果符合人体腿部的运动要求,为当前拟人机械腿的研究提供了一种新的构型。

**关键词:** 仿人机器人; 并联机械腿; 运动学性能指标; 工作空间

**中图分类号:** TP242.2; TH39      **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2012)10-1125-05

## Kinematic transmission property of a novel mechanical humanoid leg

Ji Shi-ming, Liu Yi, Li Yan-biao, Li Jing-min

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high moment inertia, low bearing capacity and can't meet the requirements of motion characteristics of humanoid robot of serial mechanism used in the current mechanical humanoid legs, a novel parallel mechanical humanoid leg was proposed, and the layout feature of a parallel humanoid mechanical leg was described. The inverse position equation of this mechanism was established. Based on this equation, the analytic expressions for the linear and angular velocity of the Jacobian matrix were derived by using the Vector method. Condition number and maneuverability of the two matrices were defined as the kinematics performance index to evaluate the kinematic transmission. At last, the distribution of the evaluation index was drawn out on the workspace respectively. The results indicate that kinematics performance of the foot is almost not affected by the movement of knee joint. The structure has three degrees of freedom and has the motion function of the ankle joint and knee joint. Simulation results meet the requirements of joint mechanics in human walking, which can provide a new configuration for the study of humanoid mechanical leg.

**Key words:** humanoid robot; parallel mechanical leg; kinematics performance index; workspace

## 0 引言

目前,拟人机器人向着结构紧凑、运动惯性小和运动灵活等方向发展<sup>[1]</sup>。在拟人机器人的研究中,拟人腿是拟人机器人能否实现仿人行走及步行质量好坏的关键所在。它对整个机器人从结构到控制,直至功能、质量和效率都具有很大的影响<sup>[2]</sup>。而拟人机械

腿结构设计中,关节及其驱动的设计又是关键。世界各国广泛展开了拟人机器人的研究,较有代表性的有:日本早稻田大学与日本YKK公司合作推出的具有完全人形结构机器人WABIAN-R<sup>[3]</sup>,本田公司相继推出的P1、P2、P3、ASIMO型拟人机器人<sup>[4]</sup>,索尼公司推出的人型娱乐型机器人SDR-3X<sup>[5]</sup>,富士通开发的两款娱乐型机器人HOAP-1和HOAP-2;美国麻省理工

收稿日期: 2012-05-16

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51005207);中国博士后基金资助项目(20090461403);浙江省教育厅基金资助项目(Y200908129);2010年度浙江省博士后科研择优资助项目(未提供);浙江工业大学重点实验室开放基金资助项目(2009EP004)

**作者简介:** 计时鸣(1957-),男,浙江温州人,教授,博士生导师,主要从事精密加工、机器人技术方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

学院人工智能实验室研制的COG机器人;德国慕尼黑工业大学的Johnnie人形机器人;瑞典Chalmers大学的Elvis机器人;西澳大利亚大学的简单低成本两足机器人Jack等。虽然我国起步较晚,但也取得了较大的进展,比如,国防科技大学研制成功了我国第一台类人型机器人—先行者,北京理工大学研制了拟人机器人BRH等。

考察现有的拟人机器人不难发现,它们的本体构型几乎都是串联的构成方式。人类行走运动过程中,其重心在腰关节部位,而上述拟人机器人的腰关节、髋关节、膝关节和踝关节等均采用串联机构,各驱动电机直接置于各关节处,增加了各运动构件的重量,远离了整个拟人机器人的重心,增加了拟人机器人的运动惯性,且在运动过程中,机器人所受的力矩较大,不利于机器人的控制和应用。相对串联机构,并联机构具有结构紧凑、承载能力强、运动惯性小等优点,可弥补串联机构的不足之处,适用于拟人机器人领域<sup>[6-9]</sup>。

本研究提出一种新型并联拟人机械腿,基于其位置反解方程,推导出速度雅可比矩阵,定义运动学性能评价指标,绘制各性能评价指标的分布规律,为这种新型并联拟人机械腿的设计、控制及应用奠定理论基础。

## 1 结构布局特点

膝关节和踝关节机构以一种三自由度并联机构为机构原型,并联拟人机械腿机构简图如图1所示。该并联机构采用2PUU/PRRRU的结构形式,即动平台通过两条相同的支链PUU(移动副-胡克铰-胡克铰)和一条支链PRRRU(移动副-转到副-转到副-转到副-胡克铰)与静平台相连。其结构布局特点如下:① 3个直线移动副 $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 相互平行且均安装在基座上;② 当杆 $FJ$ 与杆 $IF$ 共线,面 $JMN$ 垂直于杆 $FJ$ 时,各移动副输入均为零,这种状态为该机构的初始位姿。此时,移动副 $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 的初始长度为 $l_i$  ( $i=1,2,3$ ),  $\Delta l_i$ 为直线移动副 $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 的输入位

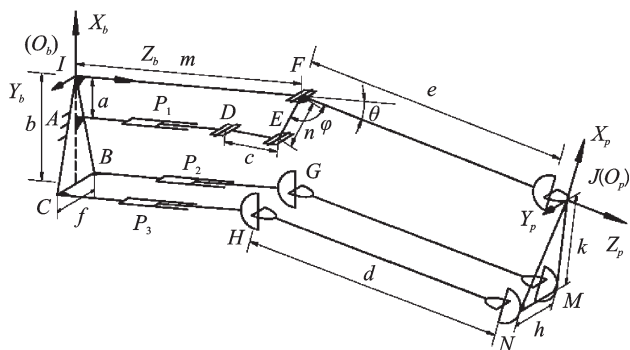


图1 并联拟人机械腿机构简图

移。根据这种机构的结构特点可知:该机械腿可绕点 $F$ 转动以实现膝关节运动,可绕 $J$ 点的 $X_p$ 轴和 $Y_p$ 轴转动来实现踝关节的运动。

根据图1的并联拟人机械腿机构简图,本研究设计了这种新型并联拟人机械腿结构,如图2所示。通过该图可以看出,该机构所有的驱动电机靠近髋关节(腰部),其优点是转动惯量较小;同时,该结构外观匀称,且与人腿相仿。

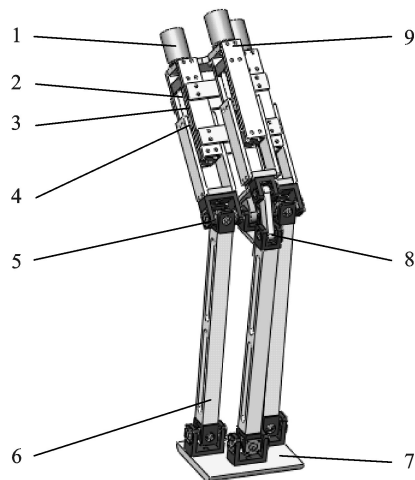


图2 并联拟人机械腿结构图

1—伺服电机;2—丝杠;3—导轨;4—滑块;5—胡克铰;6—连杆;7—动平台;8—转动铰链;9—基座

## 2 运动学传递方程

如图1所示,本研究建立两个坐标系 $\{B\}$ :  $O_b-X_bY_bZ_b$ 和 $\{P\}$ :  $O_p-X_pY_pZ_p$ ,其中坐标系 $\{B\}$ 为基坐标系,坐标系 $\{P\}$ 为动坐标系。根据这种并联拟人机械腿的结构特点,研究者可以容易地得到铰链点 $D$ 、 $E$ 、 $G$ 和 $H$ 在基坐标系 $\{B\}$ 下的位置矢量 $D_b$ 、 $E_b$ 、 $G_b$ 和 $H_b$ 及铰链点 $M$ 和 $N$ 在动坐标系 $\{P\}$ 下的位置矢量 $M_p$ 和 $N_p$ ;动坐标系 $\{P\}$ 在基坐标系 $\{B\}$ 中的位置矢量为 $O_{pb}=(x \ 0 \ z)^T$ ,姿态矢量用Y-X-Z型欧拉角表示为 $Euler(\alpha \ \beta \ 0)$ ,即先绕 $Y_p$ 轴旋转 $\alpha$ 角,再绕 $X_p$ 轴旋转 $\beta$ 角后确定的姿态。则铰链点 $M$ 和 $N$ 在基坐标系 $\{B\}$ 中的位置矢量为:

$$\begin{cases} M_b = TM_p + O_{pb} \\ N_b = TN_p + O_{pb} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ —动坐标系的姿态转换矩阵<sup>[10-11]</sup>。

由这种机构的结构布局特点,可以得到这种拟人机械腿的反解方程为:

$$\begin{cases} (E_b - D_b)^T (E_b - D_b) = c^2 \\ (M_b - G_b)^T (M_b - G_b) = d^2 \\ (N_b - H_b)^T (N_b - H_b) = d^2 \end{cases} \quad (2)$$

继而可得这种机构的位置反解:

$$\begin{cases} \Delta l_1 = \eta_1 - \lambda_1 \\ \Delta l_2 = \eta_2 - \lambda_2 \\ \Delta l_3 = \eta_3 - \lambda_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\eta_1 = m + n \cos(\theta - \varphi) - l_1;$$

$$\lambda_1 = \sqrt{c^2 - [a + n \sin(\theta - \varphi)]^2};$$

$$\eta_2 = m + e \cos \theta - \frac{h \cos \alpha \sin \beta}{2} + \sin \alpha \sqrt{k^2 - \frac{h^2}{4}} - l_2;$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{d^2 - (b + e \sin \theta - \frac{h \sin \alpha \sin \beta}{2} - \cos \alpha \sqrt{k^2 - \frac{h^2}{4}})^2 - (\frac{f}{2} - \frac{h \cos \beta}{2})^2}{\cos \alpha \sqrt{k^2 - \frac{h^2}{4}} - (\frac{f}{2} - \frac{h \cos \beta}{2})^2}};$$

$$\eta_3 = m + e \cos \theta + \frac{h \cos \alpha \sin \beta}{2} + \sin \alpha \sqrt{k^2 - \frac{h^2}{4}} - l_3;$$

$$\lambda_3 = \sqrt{\frac{d^2 - (b + e \sin \theta + \frac{h \sin \alpha \sin \beta}{2} - \cos \alpha \sqrt{k^2 - \frac{h^2}{4}})^2 - (\frac{f}{2} - \frac{h \cos \beta}{2})^2}{\cos \alpha \sqrt{k^2 - \frac{h^2}{4}} - (\frac{f}{2} - \frac{h \cos \beta}{2})^2}}.$$

设  $\mathbf{V} = (V_x \ V_y \ V_z)^T$  为动平台上的参考点  $O_p$  在基坐标系  $\{B\}$  (以下无特殊说明均表示在该坐标系下定义) 中的速度矢量,  $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$  为动平台的角速度矢量,  $V_i$  分别为移动副  $P_i (i=1,2,3)$  的输入速度。

根据  $O-O_p$  支链的结构特点,以  $\mathbf{V}_D$  表示铰链  $D$  点的速度矢量,即:

$$\mathbf{V}_D = (0 \ 0 \ V_1)^T \quad (4)$$

以  $\boldsymbol{\omega}_F$  表示杆  $EFJ$  绕铰链  $F$  点转动的角速度矢量,即:

$$\boldsymbol{\omega}_F = (0 \ \omega_F \ 0) \quad (5)$$

式中:  $\omega_F$  — 杆  $EFJ$  绕铰链  $F$  点转动的角速度。

并用  $\mathbf{V}_E$  表示铰链  $E$  点的速度矢量,有:

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega}_F \times \mathbf{r}_{FJ} \\ \mathbf{V}_E = \boldsymbol{\omega}_F \times \mathbf{r}_{FE} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{r}_{FJ}, \mathbf{r}_{FE}$  — 铰链点  $F$  到铰链点  $J$  和  $E$  的矢量。

根据刚性杆件不可伸长原理,可得:

$$\mathbf{V}_E \cdot \mathbf{r}_{DE} = \mathbf{V}_D \cdot \mathbf{r}_{DE} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{r}_{DE}$  — 铰链点  $D$  到铰链点  $E$  的矢量。

由铰链各点的位置矢量关系,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{FJ} = \mathbf{O}_{pb} - \mathbf{F}_b = (e \sin \theta \ 0 \ e \cos \theta)^T \\ \mathbf{r}_{FE} = \mathbf{E}_b - \mathbf{F}_b = (n \sin(\theta - \varphi) \ 0 \ n \cos(\theta - \varphi))^T \\ \mathbf{r}_{DE} = \mathbf{E}_b - \mathbf{D}_b = (n \sin(\theta - \varphi) + a \ 0 \ m + n \cos(\theta - \varphi) - l_1 - \Delta l_1)^T \end{cases} \quad (8)$$

综合式(1~5),可得:

$$\begin{cases} V_x = \tau \cos \theta \cdot V_1 \\ V_y = 0 \\ V_z = -\tau \sin \theta \cdot V_1 \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$\tau = \frac{e \left\{ \sin(\theta - \varphi) [n \sin(\theta - \varphi) + a] - \cos(\theta - \varphi) [m + n \cos(\theta - \varphi) - l_1 - \Delta l_1] \right\}}{n [m + n \cos(\theta - \varphi) - l_1 - \Delta l_1]}$$

由位置反解式(3)求得。

根据  $B-M$  和  $C-N$  支链的结构特点,以  $\mathbf{V}_G$  和  $\mathbf{V}_H$  表示铰链  $G$  和  $H$  点的速度矢量,即:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_G = (0 \ 0 \ V_2)^T \\ \mathbf{V}_H = (0 \ 0 \ V_3)^T \end{cases} \quad (10)$$

用  $\mathbf{V}_M$  和  $\mathbf{V}_N$  表示铰链  $M$  和  $N$  点的速度矢量,即:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_M = \mathbf{V} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{JM} \\ \mathbf{V}_N = \mathbf{V} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{JN} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{r}_{JM}, \mathbf{r}_{JN}$  — 铰链点  $J$  到铰链点  $M$  和  $N$  的矢量。

根据刚性杆件不可伸长原理,有:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_M \cdot \mathbf{r}_{GM} = \mathbf{V}_G \cdot \mathbf{r}_{GM} \\ \mathbf{V}_N \cdot \mathbf{r}_{HN} = \mathbf{V}_H \cdot \mathbf{r}_{HN} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{r}_{GM}, \mathbf{r}_{HN}$  — 铰链点  $G$  到点  $M$  和铰链点  $H$  到点  $N$  的矢量。

由铰链各点的位置矢量关系,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{JM} = \mathbf{M}_b - \mathbf{O}_{pb} \\ \mathbf{r}_{JN} = \mathbf{N}_b - \mathbf{O}_{pb} \\ \mathbf{r}_{GM} = \mathbf{M}_b - \mathbf{G}_b \\ \mathbf{r}_{HN} = \mathbf{N}_b - \mathbf{H}_b \end{cases} \quad (13)$$

用  $\boldsymbol{\omega}_p = (\omega_{px} \ \omega_{py} \ 0)^T$  表示动平台在动坐标系  $\{P\}$

中的角速度矢量,根据其位置特点有:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{T} \boldsymbol{\omega}_p \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{T}$  — 转换矩阵。

则根据式(8,9,11)可推导出:

$$\begin{cases} (\mathbf{T} \boldsymbol{\omega}_p) \times \mathbf{r}_{JM} \cdot \mathbf{r}_{GM} = (\mathbf{V}_G - \mathbf{V}) \cdot \mathbf{r}_{GM} \\ (\mathbf{T} \boldsymbol{\omega}_p) \times \mathbf{r}_{JN} \cdot \mathbf{r}_{HN} = (\mathbf{V}_H - \mathbf{V}) \cdot \mathbf{r}_{HN} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{r}_{JM} \times \mathbf{r}_{GM} \cdot (\mathbf{T} \boldsymbol{\omega}_p) = \mathbf{r}_{GM} \cdot (\mathbf{V}_G - \mathbf{V}) \\ \mathbf{r}_{JN} \times \mathbf{r}_{HN} \cdot (\mathbf{T} \boldsymbol{\omega}_p) = \mathbf{r}_{HN} \cdot (\mathbf{V}_H - \mathbf{V}) \end{cases}$$

写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{r}_{JM} \times \mathbf{r}_{GM})^T \\ (\mathbf{r}_{JN} \times \mathbf{r}_{HN})^T \end{bmatrix} \mathbf{T} \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{r}_{GM} \cdot \mathbf{e}_p & \mathbf{r}_{GM} \cdot \mathbf{e}_b & 0 \\ -\mathbf{r}_{HN} \cdot \mathbf{e}_p & 0 & \mathbf{r}_{HN} \cdot \mathbf{e}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{e}_p$  和  $\mathbf{e}_b$  满足以下关系:

$$\begin{cases} V = V_1 e_p \\ V_G = V_2 e_b \\ V_H = V_3 e_b \end{cases}$$

即可得到:

$$\begin{cases} e_p = (\tau \cos \theta & 0 & -\tau \sin \theta)^T \\ e_b = (0 & 0 & 1)^T \end{cases} \quad (16)$$

化简式(15)可得:

$$\begin{bmatrix} (r_{JM} \times r_{GM})^T \\ (r_{JN} \times r_{HN})^T \end{bmatrix} T_{(1,2)} \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{GM} \cdot e_p & r_{GM} \cdot e_b & 0 \\ -r_{HN} \cdot e_p & 0 & r_{HN} \cdot e_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

式中:  $T_{(1,2)}$  —  $T$  取前两列组成的矩阵。

继而可得:

$$\begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中:

$$A = \left( \begin{bmatrix} (r_{JM} \times r_{GM})^T \\ (r_{JN} \times r_{HN})^T \end{bmatrix} T_{(1,2)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} -r_{GM} \cdot e_p & r_{GM} \cdot e_b & 0 \\ -r_{HN} \cdot e_p & 0 & r_{HN} \cdot e_b \end{bmatrix}$$

综合式(14, 17), 可得:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} A \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

将式(13, 16)代入式(18), 即可求得  $\omega$  的值。

将式(9, 18)写成统一的形式, 有:

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中:

$$J_v = \begin{bmatrix} \tau \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\tau \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_\omega = T \begin{bmatrix} A \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中:  $J$  — 这种拟人机械腿的雅可比矩阵,  $Q$  — 其动平台上  $O_p$  点的广义速度向量,  $P$  — 其移动副的广义速度向量。

则根据式(19), 得:

$$Q = JP \quad (20)$$

其中:

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

式中:  $J_v, J_\omega$  — 这种拟人机械腿的线速度和角速度雅可比矩阵。

### 3 运动学性能评价指标

根据矩阵的奇异值分解, 雅可比矩阵  $J$  形成的映射  $Q = JP$ , 本研究将关节速度空间中的一个单位速度球映射成一个速度椭圆。椭圆的半径长度之比等于雅可比矩阵奇异值之比。当机构处于奇异形位时, 椭圆退化, 至少有一个半轴为零, 即无论关节速度怎样变化, 都无法实现该方向的速度。另一方面, 如果矩阵各向同性, 即所有的奇异值都相等, 它映射一个单位球到另一个球, 只是放大或缩小, 此时运动传递性能最好<sup>[12]</sup>。根据这种输入速度和输出速度间的映射关系的评价方法, 一个速度球的半径长度的量纲一致才有比较的意义, 所以本研究将雅可比矩阵  $J$  分成  $J_v$  和  $J_\omega$  进行计算。

为了评价该运动传递性能, 本研究用雅可比矩阵的条件数  $\|J\|/\|J^{-1}\|$  来衡量。在计算雅可比矩阵的条件数时, 笔者采用矩阵的谱范数来计算。所以矩阵  $J$  的谱范数是该矩阵的最大奇异值  $\sigma_m$ , 矩阵  $J^{-1}$  的谱范数为矩阵  $J$  的最小奇异值的倒数  $1/\sigma_m$ 。设雅可比矩阵的条件数为  $C(J)$ , 所以矩阵的条件数的计算方式的计算方式为:

$$C(J) = \frac{\sigma_m}{\sigma_m} \quad (21)$$

其中, 矩阵奇异值的计算可通过  $J^T J$  的特征值开平方求得。其物理意义是: 用速度椭圆的最长轴与最短轴之比来反映单位速度球映射成速度椭圆的扭曲度。

根据式(16)可以容易地得到  $C(J_v) \equiv 1$ , 即矩阵  $J_v$  各向同性。说明用条件数来衡量运动传递性能符合该机械腿的物理特点, 因为  $O_p$  点速度  $V$  由移动副  $P_1$  的输入速度唯一确定。为了进一步衡量  $V$  与  $P_1$  输入速度之间的线性关系  $J_v$ , 可以采用可操作度  $\omega$ , 即:

$$\omega = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_n \quad (22)$$

式中:  $\sigma_i (i=1, 2, \dots, n)$  — 雅可比矩阵的奇异值。其物理意义为用速度椭圆的各个半径乘积, 来反映单位速度球映射成速度椭圆后的体积量, 在各向同性的情况下, 反映放大或缩小的程度。

根据该拟人机械腿的特点和上一节的分析可知,  $J_v$  只与某姿态下的  $\theta$  角度有关, 而  $J_\omega$  不仅与某姿态下的  $\theta$  角度有关, 同时与姿态角  $\alpha$  和  $\beta$  关系密切。所以, 研究者可在姿态工作空间中分析  $J_\omega$  的条件数, 在由姿态工作空间确定的  $\theta$  的范围中分析  $J_v$  的可操作度。

### 4 仿真分析

设这种机械腿机构的几何参数如下:  $a=150 \text{ mm}, b=$

300 mm,  $c=150$  mm,  $d=440$  mm,  $e=440$  mm,  $f=300$  mm,  $h=300$  mm,  $k=320$  mm,  $m=440$  mm,  $n=180$  mm,  $l_1=200$  mm,  $l_2=440$  mm,  $l_3=440$  mm,  $\varphi=120^\circ$ ,  $\theta_{G\max}=\theta_{H\max}=\theta_{M\max}=\theta_{N\max}=\theta_{J\max}=40^\circ$ ,  $l_{1\min}=l_{2\min}=l_{3\min}=-150$  mm,  $l_{1\max}=l_{2\max}=l_{3\max}=200$  mm。该拟人机械腿的工作空间是满足约束条件的工作空间,由Matlab软件仿真计算,本研究绘制了角速度传递性能评价指标在姿态工作空间内的分布规律(如图3所示)和线速度传递性能评价指标在 $\theta$ 角运动范围内的分布规律(如图4所示)。

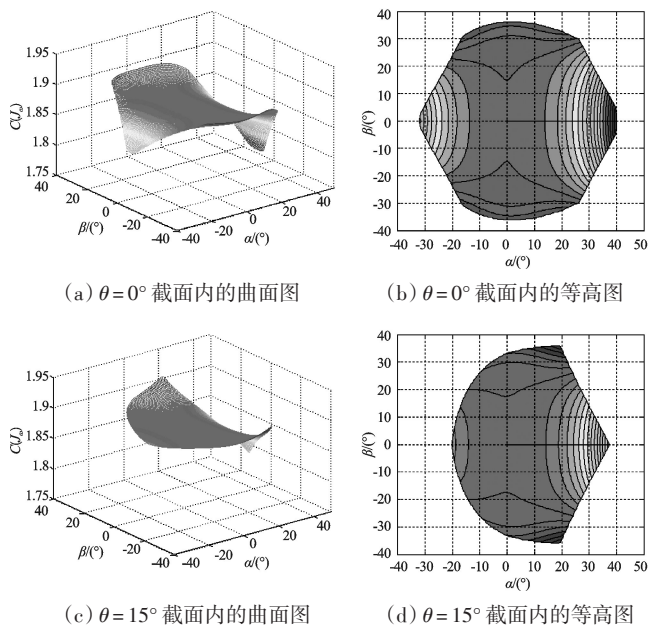


图3 角速度传递性能评价指标在姿态工作空间内的分布情况

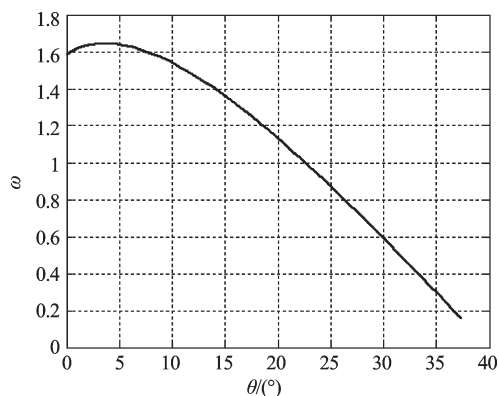


图4 线速度传递性能评价指标在 $\theta$ 角运动范围内的分布情况

由图3可知:①  $J_\omega$ 的条件数在姿态工作空间中,关于 $\beta=0^\circ$ 对称;② 在 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 的 $\pm 10^\circ$ 范围内, $J_\omega$ 的条件数值较稳定,对于不同的 $\theta$ 值,基本稳定在1.88;③ 在 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 的 $\pm 10^\circ$ 范围外, $J_\omega$ 的条件数值随 $\alpha$ 绝对值的增大而减小,随 $\beta$ 绝对值的增大而增大,但最大值不超过1.95。

由图4可知:① 在 $\theta=4^\circ$ 时, $J_v$ 的可操作度取得最大值,随后单调减小;②  $J_v$ 的可操作度在 $0^\circ \leq \theta < 22.5^\circ$ 时取值大于1, $\theta > 22.5^\circ$ 时取值小于1。

## 5 结束语

本研究对这种新型并联拟人机械腿进行了结构布局分析,该机构在功能和仿生方面良好地实现了人体踝关节和膝关节的要求,且具有运动惯性小等优点;笔者用矢量法对这种新型并联拟人机械腿的运动特点进行了研究,推导出了其运动学雅可比矩阵,该矩阵元素中的变量全部来自动平台的位姿变量,所以将工作空间作为研究该机构运动特点的载体;针对这种并联拟人机械腿的特点,本研究将雅可比矩阵划分为线速度和角速度雅可比矩阵,分别定义了各自的传递性能评价指标,给出了两者指标在工作空间内的分布规律。

仿真结果显示,在初始姿态附近运动,速度传递性能良好且稳定,即脚掌的运动传递性能几乎不受屈膝角度的影响。此外,脚跟绕膝关节运动过程中,前半部分行程速度传递性能良好,后半部分性能逐渐下降。这种机械腿的仿真结果符合人体腿部的运动要求,可以进一步对该机械腿进行动力学研究。

## 参考文献(References):

- [1] 蔡鹤翔. 机器人将是21世纪技术发展的热点[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1): 58-60.
- [2] 包志军, 马培荪, 姜山, 等. 从两足机器人到仿人型机器人的研究历史及其问题[J]. 机器人, 1999, 21(4): 312-320.
- [3] LIM H O, ISHII A, TAKANISHI A. Emotion-based biped walking[J]. *Robotics*, 2004, 22(5): 577-586.
- [4] HIRAI K, HIROSE M, HAIKAWA Y, et al. The development of HONDA humanoid robot [C]//Proceedings. Of ICRA, 1998: 1321-1326.
- [5] ISHIDA T, KUROKI Y, YAMAGUCHI J, et al. Motion entertainment by a small humanoid robot based on OPEN-R[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 2001: 1079-1086.
- [6] 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 1-17.
- [7] 刘辛军, 王劲松, 高峰, 等. 并联机器人机构新构型设计的探讨[J]. 中国机械工程, 2001, 12(12): 1339-1343.
- [8] 李仕华. 几种空间少自由度并联机器人机构分析与综合的理论研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学机械工程学院, 2004.
- [9] 卢孔宝, 陈江亮, 王铁流. 基于虚拟样机技术的并联机器人设计研究[J]. 机械, 2011, 38(12): 51-53.
- [10] 余罗兼, 李济泽. 一种改进粒子群算法的移动机器人路径规划[J]. 机电技术, 2011(5): 2-4.
- [11] 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, 2006.
- [12] 宋伟刚. 机器人学—运动学、动力学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[编辑: 罗向阳]