DOI：10.13973/j.cnki.robot.2017.0151

基于 MCPC 模型的机器宇航员运动学参数标定方法与实验

陈 钢，王 蕾，贾庆轩，孙汉旭，王仕卫
（北京邮电大学自动化学院，北京 100876）

摘 要：针对机器宇航员提出了一种基于 MCPC（修正的完整参数连续）模型的运动学参数标定方法．在分析机器宇航员关节柔性和连杆柔性的基础上，采用 MCPC 方法建立了综合考虑几何误差和柔性误差的机器宇航员误差模型，提出了机器宇航员运动学参数标定方法．通过实验验证了本文提出的标定方法能够消除柔性因素对运动学参数标定的影响，获得精确的运动学参数，并有效提高机器宇航员操作精度．

关键词：机器宇航员；误差模型；运动学参数标定
中图分类号：TP242 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-0446(2017)-02-0151-09

Calibration Method and Experiments of Kinematic Parameters for Robonaut Based on MCPC Model

CHEN Gang，WANG Lei，JIA Qingxuan，SUN Hanxu，WANG Shiwei
(*School of Automation*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*)

Abstract: A robonaut kinematic calibration method based on MCPC (modified complete and parametrically continuous) model is proposed. On the basis of the analysis on the robonaut joint and link flexibility, a composite error model considering both geometric error and flexibility error is established using the MCPC method. And then, a robonaut kinematic parameter calibration method is proposed. Experimental results show that the proposed calibration method can eliminate the influence of flexible factors on kinematic parameter calibration and obtain accurate kinematic parameters, and can effectively improve the operation precision of robonaut.

Keywords: robonaut; error model; kinematic parameter calibration

1 引言（Introduction）

空间机器人在太空舱对接、目标星捕获、在轨维修及科学考察等空间探索任务中正发挥着不可或缺的作用．随着空间探索的不断深入，空间操作任务变得越来越繁重复杂，对空间机器人的操作能力、操作精度以及操作效率提出了更高的要求．机器宇航员作为一类新型的空间机器人应运而生，其由 1 个躯干分支和 2 个手臂分支构成，具备协调操作能力．机器宇航员自由度数多，具有操作灵活性高、应用范围广、任务适应性好等特点，常被用来完成空间搬运、插拔、旋拧等精细操作任务，这些操作任务对机器宇航员的操作精度提出了高要求．

影响机器宇航员操作精度的误差源包括几何误差和非几何误差．几何误差主要指由制造安装引起的运动学参数误差，非几何误差主要指由连杆及关节变形引起的柔性误差．几何误差可以通过建立误差模型，依靠运动学参数标定手段实现补偿．运动学参数标定的常用优化算法有：最小二乘法、LM（Levenberg-Marquardt）算法、模拟退火法、置信域法等[1-4]．以上方法能实现单臂机器人运动学参数标定，可以为双臂机器人运动学参数标定提供技术基础．针对双臂机器人运动学参数标定，Bonitz[5]等人采用非线性优化方法标定双臂机器人运动学参数，该方法在测量过程中需要人工对齐网格板，操作流程复杂且会引入一定人为误差．李文广[6]提出了 3 种基于距离精度、平面精度、直线精度的双臂机器人标定方法，这 3 种方法需要利用球铰链连接两机器人末端，标定时会在双臂机器人之间产生内应力，影响标定效果．上述双臂机器人运动学参数标定方法，可为机器宇航员双臂间几何误差补偿提供思路，但机器宇航员本身具有耦合分支，与独立双臂机器人在运动学误差的产生机理上又有所不同．

基金项目：国家自然科学基金（61403038）；国家 973 计划（2013CB733000）．
通信作者：陈钢，buptcg@163.com
收稿/录用/修回：2016-12-27/2017-01-25/2017-02-09

针对机器人柔性误差，Khalil[7] 等人在误差模型中综合了关节和连杆柔性的影响，但该方法对末端位姿误差的补偿效果不够理想．Meggiolaro[8] 等人采用多项式近似法对柔性误差进行了建模，该方法中表征机器人几何误差和柔性误差的多项式为非线性函数，需要大量测量数据以实现标定，标定效率较低．Zhou[9] 等人提出了一种同时辨识运动学参数和刚度参数的方法，但该方法仅分析了关节柔性的影响，且无法求解出全部运动学参数．刘志[2] 等人采用 CPA（circle point analysis）方法和 LM 方法辨识柔性机器人的运动参数，但其柔性误差模型中仅考虑了弯曲变形，未对机器人柔性变形的影响作全面的分析．以上研究工作主要存在以下 2 点不足：(1) 标定所需测量数据过多，导致标定效率降低，标定成本增加；(2) 针对机器人柔性变形的分析不够全面，仅在标定中考虑了部分柔性因素，影响了标定效果．

为了提高机器宇航员操作精度，本文综合考虑关节柔性和连杆柔性对机器宇航员末端精度的影响，提出一种基于 MCPC 模型的运动学参数标定方法．利用该方法能够消除柔性因素对运动学参数标定的影响，获得准确的运动学参数，以提高机器宇航员的操作精度．

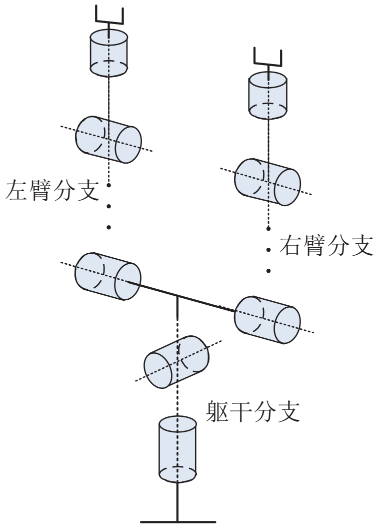

图 1　机器宇航员结构示意图

Fig.1　Structure diagram of the robonaut

2　机器宇航员几何误差建模（Modeling of robonaut geometric error）

2.1　研究对象

机器宇航员由躯干分支和 2 个手臂分支组成．其结构示意图如图 1 所示．躯干分支类似于人类的腰部关节，一般由 2 到 3 个关节组成，可以完成俯仰、回转等动作．相比普通双臂机器人，机器宇航员具有拟人化的构型，操作更加灵活，可以适应复杂的空间操作任务．根据其结构特点，机器宇航员的操作精度不仅与手臂分支自身有关，还受到躯干分支的影响．为标定机器宇航员手臂分支与躯干分支的运动学参数，需要建立机器宇航员几何误差模型．

2.2　机器宇航员运动学模型

机器宇航员几何误差建模的基础是运动学模型．机器人运动学建模的经典方法为 DH（Denavit-Hartenberg）参数法，但该方法建立的运动学模型具有不连续、不完整的缺陷，因此本文采用 MCPC 法[10] 进行运动学建模．

MCPC 方法采用 α、β、x、y 四个参数描述连杆坐标系间的变换关系，针对第 i 个连杆坐标系 Σ_i 的具体建系方法如图 2 所示：

① 以关节 i 轴线方向为 Z_i 轴；

② 构建平面 P_i，使其垂直于 Z_i 轴且通过坐标系 Σ_{i-1} 的原点，以 P_i 与 Z_i 的交点为坐标系 Σ_i 的原点；

③ 绕 X_{i-1} 轴旋转 α_i 角，使 Y_{i-1} 轴位于平面 P_i 上，以当前 Y_{i-1} 轴的方向为 Y_i 轴的方向；

④ 绕 Y_i 轴旋转 β_i 角，使 X_{i-1} 轴位于平面 P_i 上，以当前 X_{i-1} 轴的方向为 X_i 轴的方向．

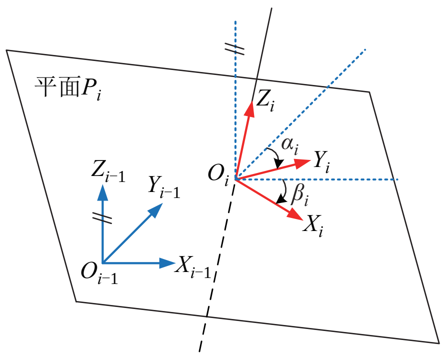

图 2　MCPC 建系方法示意图

Fig.2　Schematic diagram of MCPC method

根据以上建系方法，中间连杆坐标系间的变换矩阵可表示为

$$\boldsymbol{T}_i = \boldsymbol{Q}_{i-1}\mathrm{rot}(x,\alpha_i)\mathrm{rot}(y,\beta_i)\mathrm{trans}(x_i,y_i,0) \qquad (1)$$

其中，$\boldsymbol{Q}_i \in \mathrm{R}^{4\times4}$ 表示关节 i 旋转对应的变换矩阵，$\mathrm{rot}(k,\theta) \in \mathrm{R}^{4\times4}$ 表示绕 k 轴旋转 θ 角对应的变换矩阵，$\mathrm{trans}(x,y,z) \in \mathrm{R}^{4\times4}$ 表示沿坐标系 X、Y、Z 三轴平移 x、y、z 距离对应的变换矩阵．

MCPC 方法针对工具坐标系添加了 2 个参数 γ_t 和 z_t，用于描述工具坐标系绕末端连杆坐标系 Z_n 轴

的旋转和沿 Z_n 轴的平移，则工具坐标系相对于末端连杆坐标的变换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{\text{tool}}=\boldsymbol{Q}_n\text{rot}(x,\alpha_{\text{t}})\text{rot}(y,\beta_{\text{t}})\text{rot}(z,\gamma_{\text{t}})\text{trans}(x_{\text{t}},y_{\text{t}},z_{\text{t}}) \tag{2}$$

根据式 (1) 和 (2) 可得到工具坐标系与惯性系间的变换关系为

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}_1\cdot\boldsymbol{T}_2\cdots\boldsymbol{T}_n\cdot\boldsymbol{T}_{\text{tool}} \tag{3}$$

对于机器宇航员，则有

$$\begin{cases}\boldsymbol{T}_{\text{L}}=(\boldsymbol{T}_1\cdot\boldsymbol{T}_2\cdots\boldsymbol{T}_k)(\boldsymbol{T}_{\text{L1}}\cdot\boldsymbol{T}_{\text{L2}}\cdots\boldsymbol{T}_{\text{L}n}\cdot\boldsymbol{T}_{\text{LT}})\\ \boldsymbol{T}_{\text{R}}=(\boldsymbol{T}_1\cdot\boldsymbol{T}_2\cdots\boldsymbol{T}_k)(\boldsymbol{T}_{\text{R1}}\cdot\boldsymbol{T}_{\text{R2}}\cdots\boldsymbol{T}_{\text{R}n}\cdot\boldsymbol{T}_{\text{RT}})\end{cases} \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{T}_{\text{L}}$ 和 $\boldsymbol{T}_{\text{R}}$ 分别表示左、右臂工具坐标系与惯性系间的变换关系，$\boldsymbol{T}_i$ 表示耦合分支连杆坐标系间的变换矩阵，$\boldsymbol{T}_{\text{L}i}$ 和 $\boldsymbol{T}_{\text{R}i}$ 分别表示左、右臂分支连杆坐标系间的变换矩阵，$\boldsymbol{T}_{\text{LT}}$ 和 $\boldsymbol{T}_{\text{RT}}$ 分别表示左、右臂分支工具坐标系相对于末端连杆坐标的变换矩阵.

2.3　机器宇航员几何误差模型

在运动学建模基础上可进一步推导出机器宇航员几何误差模型. 根据 MCPC 方法的特点，需要分别推导中间连杆坐标系位姿误差模型和工具坐标系位姿误差模型，进而综合得到机器人几何误差模型.

2.3.1　中间连杆坐标系位姿误差模型

假定坐标系 Σ_i 与坐标系 Σ_{i-1} 之间的名义变换矩阵为 $\boldsymbol{T}_i^{\text{N}}$，实际变换矩阵为 $\boldsymbol{T}_i^{\text{A}}$，则坐标系名义与实际变换矩阵的偏差为

$$\text{d}\boldsymbol{T}_i=\boldsymbol{T}_i^{\text{A}}-\boldsymbol{T}_i^{\text{N}}=\boldsymbol{T}_i^{\text{N}}\cdot\boldsymbol{\Delta}_i \tag{5}$$

该偏差 $\text{d}\boldsymbol{T}_i$ 也可表示为连杆间变换矩阵对运动学参数的偏微分，如式 (6) 所示：

$$\text{d}\boldsymbol{T}_i=\frac{\partial\boldsymbol{T}_i}{\partial\alpha_i}\Delta\alpha_i+\frac{\partial\boldsymbol{T}_i}{\partial\beta_i}\Delta\beta_i+\frac{\partial\boldsymbol{T}_i}{\partial x_i}\Delta x_i+\frac{\partial\boldsymbol{T}_i}{\partial y_i}\Delta y_i \tag{6}$$

定义误差变换矩阵 $\boldsymbol{\Delta}_i$ 为

$$\boldsymbol{\Delta}_i=\begin{bmatrix}0&-\delta_{iz}&\delta_{iy}&d_{ix}\\ \delta_{iz}&0&-\delta_{ix}&d_{iy}\\ -\delta_{iy}&\delta_{ix}&0&d_{iz}\\ 0&0&0&0\end{bmatrix} \tag{7}$$

由式 (5) ～ (7) 可计算得到中间连杆坐标系的位姿误差向量，如式 (8) 所示：

$$\begin{bmatrix}d_{ix}\\ d_{iy}\\ d_{iz}\\ \delta_{ix}\\ \delta_{iy}\\ \delta_{iz}\end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c:c:c:c}-y_i\text{s}\beta_i&0&1&0\\ x_i\text{s}\beta_i&0&0&1\\ y_i\text{c}\beta_i&-x_i&0&0\\ \hdashline \text{c}\beta_i&0&0&0\\ 0&1&0&0\\ \text{s}\beta_i&0&0&0\end{array}\right]\begin{bmatrix}\Delta\alpha_i\\ \Delta\beta_i\\ \Delta x_i\\ \Delta y_i\end{bmatrix} \tag{8}$$

其中，$\text{s}\theta$ 为 $\sin\theta$ 的简记，$\text{c}\theta$ 为 $\cos\theta$ 的简记.

式 (8) 即为中间连杆坐标系误差模型，反映了连杆运动学参数误差与该连杆坐标系位姿误差之间的映射关系.

2.3.2　工具坐标系位姿误差模型

类似地，工具坐标系变换矩阵的偏差 $\text{d}\boldsymbol{T}_{\text{tool}}$ 为

$$\text{d}\boldsymbol{T}_{\text{tool}}=\boldsymbol{T}_{\text{tool}}^{\text{A}}-\boldsymbol{T}_{\text{tool}}^{\text{N}}=\boldsymbol{T}_{\text{tool}}^{\text{N}}\cdot\boldsymbol{\Delta}_{\text{tool}} \tag{9}$$

该偏差也可表示为末端连杆坐标系与工具坐标系间变换矩阵对运动学参数的偏微分

$$\begin{aligned}\text{d}\boldsymbol{T}_{\text{tool}}=&\frac{\partial\boldsymbol{T}_{\text{tool}}}{\partial\alpha_{\text{t}}}\Delta\alpha_{\text{t}}+\frac{\partial\boldsymbol{T}_{\text{tool}}}{\partial\beta_{\text{t}}}\Delta\beta_{\text{t}}+\frac{\partial\boldsymbol{T}_{\text{tool}}}{\partial\gamma_{\text{t}}}\Delta\gamma_{\text{t}}+\\&\frac{\partial\boldsymbol{T}_{\text{tool}}}{\partial x_{\text{t}}}\Delta x_{\text{t}}+\frac{\partial\boldsymbol{T}_{\text{tool}}}{\partial y_{\text{t}}}\Delta y_{\text{t}}+\frac{\partial\boldsymbol{T}_{\text{tool}}}{\partial z_{\text{t}}}\Delta z_{\text{t}}\end{aligned} \tag{10}$$

则工具坐标系的位姿误差向量如式 (11) 所示：

$$\begin{bmatrix}d_{\text{tx}}\\ d_{\text{ty}}\\ d_{\text{tz}}\\ \delta_{\text{tx}}\\ \delta_{\text{ty}}\\ \delta_{\text{tz}}\end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c:c:c:c:c:c}-y_{\text{t}}\text{s}\beta_{\text{t}}-z_{\text{t}}\text{c}\beta_{\text{t}}\text{s}\gamma_{\text{t}}&z_{\text{t}}\text{c}\gamma_{\text{t}}&-y_{\text{t}}&1&0&0\\ x_{\text{t}}\text{s}\beta_{\text{t}}-z_{\text{t}}\text{c}\beta_{\text{t}}\text{c}\gamma_{\text{t}}&-z_{\text{t}}\text{s}\gamma_{\text{t}}&x_{\text{t}}&0&1&0\\ \text{c}\beta_{\text{t}}(y_{\text{t}}\text{c}\gamma_{\text{t}}+x_{\text{t}}\text{s}\gamma_{\text{t}})&-x_{\text{t}}\text{c}\gamma_{\text{t}}+y_{\text{t}}\text{s}\gamma_{\text{t}}&0&0&0&1\\ \hdashline \text{c}\beta_{\text{t}}\text{c}\gamma_{\text{t}}&\text{s}\gamma_{\text{t}}&0&0&0&0\\ -\text{c}\beta_{\text{t}}\text{s}\gamma_{\text{t}}&\text{c}\gamma_{\text{t}}&0&0&0&0\\ \text{s}\beta_{\text{t}}&0&1&0&0&0\end{array}\right]\begin{bmatrix}\Delta\alpha_{\text{t}}\\ \Delta\beta_{\text{t}}\\ \Delta\gamma_{\text{t}}\\ \Delta x_{\text{t}}\\ \Delta y_{\text{t}}\\ \Delta z_{\text{t}}\end{bmatrix} \tag{11}$$

式 (11) 即为工具坐标系误差模型，反映了工具系运动学参数误差与其位姿误差之间的映射关系.

2.3.3　机器宇航员末端位姿误差模型

以 $\boldsymbol{T}^{\text{N}}$ 和 $\boldsymbol{T}^{\text{A}}$ 分别表示工具坐标系 Σ_{tool} 相对于

惯性系 Σ_0 的名义变换矩阵和实际变换矩阵，以 d$\boldsymbol{T}$ 表示名义与实际变换矩阵的偏差，忽略高阶无穷小，有

$$\begin{aligned}\mathrm{d}\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}^{\mathrm{A}}-\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}&=\prod_{i=1}^{n}\left(\boldsymbol{T}_i^{\mathrm{N}}+\mathrm{d}\boldsymbol{T}_i\right)\left(\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}}^{\mathrm{N}}+\mathrm{d}\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}}\right)-\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}\\&\approx\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{T}_1\cdots\boldsymbol{T}_{i-1}\mathrm{d}\boldsymbol{T}_i\cdot\boldsymbol{T}_{i+1}\cdots\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}})+\boldsymbol{T}_1\cdots\boldsymbol{T}_n\mathrm{d}\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}}\\&=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}(\boldsymbol{T}_{i+1}\cdots\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}})^{-1}\boldsymbol{\Delta}_i(\boldsymbol{T}_{i+1}\cdots\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}})+\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{tool}}\end{aligned}\tag{12}$$

令 $\boldsymbol{U}_i=\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{T}_{i+1}\cdots\boldsymbol{T}_n\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}}$，$\boldsymbol{U}_{n+1}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{tool}}$，则

$$\mathrm{d}\boldsymbol{T}=\sum_{i=1}^{n}\left(\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}\boldsymbol{U}_{i+1}^{-1}\boldsymbol{\Delta}_i\boldsymbol{U}_{i+1}\right)+\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{tool}}=\boldsymbol{T}^{\mathrm{N}}\boldsymbol{\Delta}\tag{13}$$

定义 $\boldsymbol{U}_i=\left[\begin{array}{ccc:c}\boldsymbol{n}_i^u&\boldsymbol{o}_i^u&\boldsymbol{a}_i^u&\boldsymbol{p}_i^u\\\hdashline 0&0&0&1\end{array}\right]$，则由式 (13) 可推导出机器人末端位姿误差向量，如式 (14) 所示：

$$\begin{bmatrix}d_x\\d_y\\d_z\\\delta_x\\\delta_y\\\delta_z\end{bmatrix}=\sum_{i=1}^{n}\begin{bmatrix}(\boldsymbol{n}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}&(\boldsymbol{p}_{i+1}^u\times\boldsymbol{n}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}\\(\boldsymbol{o}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}&(\boldsymbol{p}_{i+1}^u\times\boldsymbol{o}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}\\(\boldsymbol{a}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}&(\boldsymbol{p}_{i+1}^u\times\boldsymbol{a}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&(\boldsymbol{n}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&(\boldsymbol{o}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&(\boldsymbol{a}_{i+1}^u)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d_{ix}\\d_{iy}\\d_{iz}\\\delta_{ix}\\\delta_{iy}\\\delta_{iz}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}d_{\mathrm{t}x}\\d_{\mathrm{t}y}\\d_{\mathrm{t}z}\\\delta_{\mathrm{t}x}\\\delta_{\mathrm{t}y}\\\delta_{\mathrm{t}z}\end{bmatrix}\tag{14}$$

将式 (8) 和 (11) 代入式 (14)，并以 ${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}}$ 表示机器人末端位姿误差向量，以 $\boldsymbol{e}_i$ 和 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{t}}$ 表示连杆和工具运动学参数误差，以 $\boldsymbol{J}_i$ 表示连杆运动学参数误差与连杆坐标系位姿误差之间的传递矩阵，以 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{t}}$ 表示工具运动学参数误差与工具坐标系位姿误差之间的传递矩阵，可得

$${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{e}_i+\boldsymbol{J}_{\mathrm{t}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{t}}={}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}}\cdot\boldsymbol{e}\tag{15}$$

其中，${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}}$ 为机器人运动学参数误差与末端位姿误差之间的误差传递矩阵，$\boldsymbol{e}$ 为机器人全部运动学参数误差向量.

对机器宇航员，则有

$$\begin{cases}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Lg}}=\displaystyle\sum_{i=1}^{k}\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{e}_i+\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{J}_{\mathrm{L}i}\boldsymbol{e}_{\mathrm{L}i}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lt}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{Lt}}={}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lg}}\cdot\boldsymbol{e}_{\mathrm{L}}\\{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Rg}}=\displaystyle\sum_{i=1}^{k}\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{e}_i+\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{J}_{\mathrm{R}i}\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}i}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rt}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{Rt}}={}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rg}}\cdot\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}\end{cases}\tag{16}$$

其中，${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Lg}}$ 和 ${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Rg}}$ 分别表示左、右臂末端位姿误差向量，$\boldsymbol{J}_i$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{L}i}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{R}i}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lt}}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rt}}$ 分别表示耦合分支连杆系、左右臂连杆系和左右臂工具系的运动学参数误差传递矩阵，$\boldsymbol{e}_i$、$\boldsymbol{e}_{\mathrm{L}i}$ 和 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}i}$、$\boldsymbol{e}_{\mathrm{Lt}}$ 和 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{Rt}}$ 分别表示耦合分支连杆系、左右臂连杆系和左右臂工具系的运动学参数，${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lg}}$ 和 ${}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rg}}$ 分别表示左、右臂运动学参数误差传递矩阵，$\boldsymbol{e}_{\mathrm{L}}$ 和 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}$ 分别表示左、右臂分支与耦合分支的全部运动学参数.

将式 (16) 求得的末端位姿误差向量转换为惯性系下的表示即完成机器宇航员几何误差建模.

$$\begin{cases}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Lg}}=\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{L}}\cdot{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Lg}}=\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{L}}\cdot{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lg}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{L}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lg}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{L}}\\\boldsymbol{D}_{\mathrm{Rg}}=\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{R}}\cdot{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_{\mathrm{Rg}}=\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{R}}\cdot{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rg}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rg}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}\end{cases}\tag{17}$$

其中，$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{L}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{\mathrm{LT}}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{R}_{\mathrm{LT}}\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{R}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{\mathrm{RT}}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{R}_{\mathrm{RT}}\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{LT}}$ 和 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{RT}}$ 分别为左、右臂分支工具坐标系相对于惯性系的旋转变换矩阵.

3 机器宇航员柔性误差建模（Modeling of robonaut flexibility error）

为分析机器宇航员柔性变形对运动学参数标定的影响，需要建立机器宇航员柔性误差模型．机器宇航员的柔性误差由关节变形和连杆变形引起，因此需分别对关节柔性误差和连杆柔性误差进行建模．Lightcap[11] 等人在机器人柔性误差模型中引入了高阶弹性系数，其实验结果表明高阶弹性误差量对末端精度的影响非常小，因此本文在进行柔性误差建模时忽略了高阶弹性误差的影响．针对关节柔性，通过计算关节受外载荷引起的弯曲与扭转变形量可得到关节坐标系的微分运动向量．针对连杆柔性，通过计算连杆的拉伸、弯曲和扭转变形量可得到连杆坐标系的微分运动向量．综合关节与连杆的柔性变形即可建立机器宇航员柔性误差模型.

3.1 关节柔性误差模型

关节受外载荷作用会产生弯曲变形与扭转变形．变形引起的关节坐标系微分运动如图 3 所示，变形量可由式 (18) 计算：

$$\begin{cases}\Delta\theta_{\mathrm{J}i}=K_{\mathrm{T}i}\tau_{zi}\\\Delta\alpha_{\mathrm{J}i}=K_{\mathrm{B}i}\tau_{xi}\\\Delta\beta_{\mathrm{J}i}=K_{\mathrm{B}i}\tau_{yi}\end{cases}\tag{18}$$

其中，$\Delta\theta_{\mathrm{J}i}$ 为由关节扭转变形引起的关节角误差，$K_{\mathrm{T}i}$ 为关节 i 的扭转刚度系数，τ_{zi} 为关节 i 所受扭矩大小．$\Delta\alpha_{\mathrm{J}i}$、$\Delta\beta_{\mathrm{J}i}$ 为由关节弯曲变形引起的微分转动，$K_{\mathrm{B}i}$ 为关节 i 的弯曲刚度系数，τ_{xi}、τ_{yi} 为关节 i 所受弯矩大小.

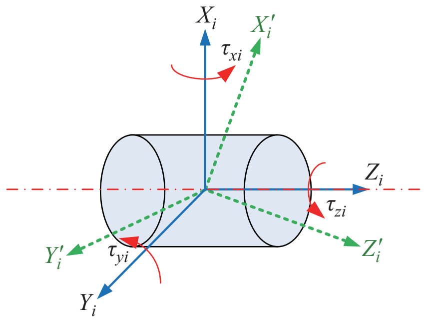

图 3　关节变形引起的关节坐标系微分运动示意图
Fig.3　The differential motion of the joint coordinate system caused by joint deformation

以 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{J}i}$ 为关节力矩阵，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{J}i}$ 为关节刚度矩阵，则由关节 i 柔性变形引起的关节坐标系的微分运动向量 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}\_i}$ 为

$$\boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}\_i} = [\Delta x_{\mathrm{J}i}, \Delta y_{\mathrm{J}i}, \Delta z_{\mathrm{J}i}, \Delta\alpha_{\mathrm{J}i}, \Delta\beta_{\mathrm{J}i}, \Delta\theta_{\mathrm{J}i}]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{J}i} \cdot \boldsymbol{S}_{\mathrm{J}i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \tau_x & 0 \\ \tau_y & 0 \\ 0 & \tau_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{\mathrm{B}i} \\ K_{\mathrm{T}i} \end{bmatrix} \tag{19}$$

由关节柔性引起的机器人末端位姿误差向量为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{joint}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{joint}} \cdot \boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}} = [\boldsymbol{J}_{\mathrm{J1}} \;\; \boldsymbol{J}_{\mathrm{J2}} \;\; \cdots \;\; \boldsymbol{J}_{\mathrm{J}n}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}\_1} \\ \boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}\_2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}\_n} \end{bmatrix} \tag{20}$$

其中，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{J}i}$ 为各关节坐标系的微分运动向量与末端位姿误差之间的传递矩阵，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{joint}}$ 为关节柔性误差传递矩阵，$\boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}}$ 为各关节坐标系微分运动向量.

式 (20) 即为关节柔性误差模型，反映了各关节柔性误差与机器人末端位姿误差之间的映射关系.

3.2　连杆柔性误差模型

分析连杆变形时以连杆首端为固定端，末端为自由端．将连杆坐标系 $OXYZ$ 平移到连杆末端可得到连杆末端坐标系 $O_{\mathrm{e}}X_{\mathrm{e}}Y_{\mathrm{e}}Z_{\mathrm{e}}$，受力分析如图 4 所示.

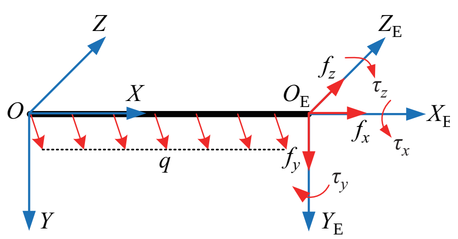

图 4　连杆受力分析图
Fig.4　Analysis on the forces acting on the link

综合连杆拉伸、弯曲与扭转变形可推导出变形后连杆末端坐标系的微分运动向量 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{link}\_i}$ 为

$$\boldsymbol{d}_{\mathrm{link}\_i} = [\Delta x_{\mathrm{L}i}, \Delta y_{\mathrm{L}i}, \Delta z_{\mathrm{L}i}, \Delta\alpha_{\mathrm{L}i}, \Delta\beta_{\mathrm{L}i}, \Delta\theta_{\mathrm{L}i}]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{L}i} \cdot \boldsymbol{S}_{\mathrm{L}i} = \begin{bmatrix} f_x l + \dfrac{q_x l^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{f_y l^3}{3} + \dfrac{\tau_z l^2}{2} + \dfrac{q_y l^4}{8} & 0 \\ 0 & \dfrac{f_z l^3}{3} - \dfrac{\tau_y l^2}{2} + \dfrac{q_z l^4}{8} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_x l \\ 0 & \dfrac{f_z l^2}{2} + \tau_y l - \dfrac{q_z l^3}{6} & 0 \\ 0 & \dfrac{f_y l^2}{2} + \tau_z l + \dfrac{q_y l^3}{6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{1}{EA} \\ \dfrac{1}{EI} \\ \dfrac{1}{GI_p} \end{bmatrix} \tag{21}$$

其中，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}i}$ 表示连杆力矩阵，f_x、f_y、f_z 分别为连杆末端所受集中力在 X、Y、Z 三轴上的分量，τ_x、τ_y、τ_z 分别为连杆末端所受力矩在 X、Y、Z 三轴上的分量，q_x、q_y、q_z 分别为连杆所受均布载荷在 X、Y、Z 三轴上的分量，l 为连杆长度；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{L}i}$ 表示连杆刚度矩阵，EA 为连杆拉伸刚度，EI 为连杆弯曲刚度，GI_p 为连杆扭转刚度.

由连杆柔性引起的机器人末端位姿误差向量为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{link}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{link}} \cdot \boldsymbol{d}_{\mathrm{link}} = [\boldsymbol{J}_{\mathrm{L1}} \;\; \boldsymbol{J}_{\mathrm{L2}} \;\; \cdots \;\; \boldsymbol{J}_{\mathrm{L}n}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{d}_{\mathrm{link}\_1} \\ \boldsymbol{d}_{\mathrm{link}\_2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{d}_{\mathrm{link}\_n} \end{bmatrix} \tag{22}$$

其中，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{L}i}$ 为各连杆坐标系的微分运动向量与末端位姿误差之间的传递矩阵，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{link}}$ 为连杆柔性误差传递矩阵，$\boldsymbol{d}_{\mathrm{link}}$ 为各连杆坐标系微分运动向量.

式 (22) 即为连杆柔性误差模型，反映了各连杆柔性误差与机器人末端位姿误差之间的映射关系.

综合连杆柔性误差模型与关节柔性误差模型可得到柔性变形引起的末端位姿误差向量为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{f}} \boldsymbol{d}_{\mathrm{f}} = [\boldsymbol{J}_{\mathrm{link}} \;\; \boldsymbol{J}_{\mathrm{joint}}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{d}_{\mathrm{link}} \\ \boldsymbol{d}_{\mathrm{joint}} \end{bmatrix} \tag{23}$$

对于机器宇航员，则有

$$\begin{cases} \boldsymbol{D}_{\mathrm{Lf}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{Cf}} \boldsymbol{d}_{\mathrm{Cf}} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{Lf}} \boldsymbol{d}_{\mathrm{Lf}} \\ \boldsymbol{D}_{\mathrm{Rf}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{Cf}} \boldsymbol{d}_{\mathrm{Cf}} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{Rf}} \boldsymbol{d}_{\mathrm{Rf}} \end{cases} \tag{24}$$

其中，$\boldsymbol{D}_{\mathrm{Lf}}$ 和 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{Rf}}$ 分别表示左、右臂因柔性变形引起的末端位姿误差向量，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{Cf}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{Lf}}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{Rf}}$ 分别表示

耦合分支、左右臂分支的柔性误差传递矩阵，$\boldsymbol{d}_{\mathrm{Cf}}$、$\boldsymbol{d}_{\mathrm{Lf}}$ 和 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{Rf}}$ 分别表示耦合分支、左右臂分支各连杆与关节坐标系的柔性误差向量.

至此即建立了机器宇航员柔性误差模型. 该模型反映了耦合分支柔性误差和臂杆柔性误差对机器宇航员末端位姿误差的影响.

4　机器宇航员运动学参数标定方法（Calibration method of robonaut kinematic parameters）

机器宇航员末端位姿误差主要由几何误差和柔性误差共同作用产生. 末端位姿误差 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{end}}$ 可表示为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{end}}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}}+\boldsymbol{D}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{e}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{d}_{\mathrm{f}} \tag{25}$$

为了获得准确的机器宇航员运动学参数，需要利用运动学参数误差与末端位姿误差之间的映射关系，实现对运动学参数误差的求解. 然而根据式 (25) 可以发现，实测的机器宇航员末端位姿误差耦合了柔性误差的影响，因而需要将柔性误差的影响从实测误差中剔除.

针对机器宇航员的每组构型，可通过计算得到其理论末端位姿，通过测量得到其实际末端位姿，进而可计算出该构型下的末端位姿误差 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{end}}$，根据当前构型和机器宇航员所受外力可计算出柔性变形引起的末端位姿误差 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{f}}$. 机器宇航员当前构型下由运动学参数误差引起的末端位姿误差为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{end}}-\boldsymbol{D}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{e} \tag{26}$$

n 自由度的机器宇航员的 MCPC 模型共有 $4n+12$ 个运动学参数，为求解出全部运动学参数误差，取 m 组构型构建超定方程组，如式 (27) 所示：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}1}\\ \vdots \\ \boldsymbol{D}_{\mathrm{g}m}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}1}\\ \vdots \\ \boldsymbol{J}_{\mathrm{g}m}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{e} \tag{27}$$

记 $\overline{\boldsymbol{D}}_{\mathrm{g}}=[\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}1}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}2}^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{D}_{\mathrm{g}m}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，$\overline{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{g}}=[\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}1}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}2}^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}m}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，则式 (27) 可写为

$$\overline{\boldsymbol{D}}_{\mathrm{g}}=\overline{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{e} \tag{28}$$

利用最小二乘法求解式 (28)，得

$$\boldsymbol{e}=\left(\overline{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{g}}\right)^{+}\cdot\overline{\boldsymbol{D}}_{\mathrm{g}} \tag{29}$$

其中，$(\overline{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{g}})^{+}$ 表示误差传递矩阵 $\overline{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{g}}$ 的伪逆.

利用式 (29) 即可求得机器人全部运动学参数误差，用求解量可对名义运动学参数进行修正. 为保证修正后的运动学参数满足精度要求，需要通过有限次迭代使误差收敛到允许范围内，迭代流程图如图 5 所示.

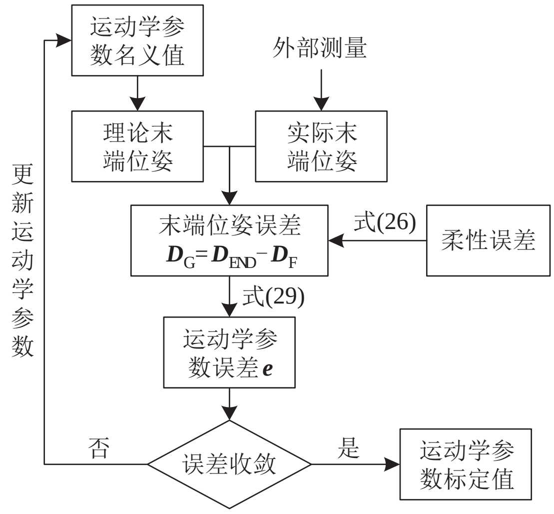

图 5　运动学参数求解迭代流程图

Fig.5　Iteration process for solving kinematic parameters

5　实验方法与数据分析（Experimental methods and data analysis）

5.1　实验对象

以模块化三分支机器人作为实物实验的研究对象，如图 6 所示. 该机器人采用德国 Schunk 公司生产的模块组合而成，每个模块即一个关节，所有关节均为旋转关节. 其中，左臂有 6 自由度，右臂有 5 自由度，耦合分支有 2 自由度，其名义 MCPC 参数如表 1 所示.

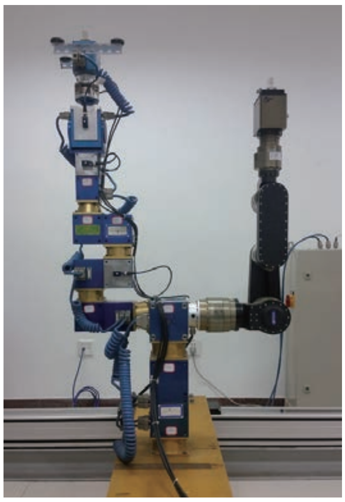

图 6　模块化三分支机器人

Fig.6　Three-branch modular robot

表 1　三分支机器人 MCPC 参数名义值

Tab.1　Nominal MCPC parameters of the three-branch robot

		α	β	γ	x	y	z
耦合	0	0	0	\	0	0	\
	1	−90	0	\	0	−385	\
左臂	0	0	90	\	110	0	\
	1	0	0	\	0	−135	\
	2	0	0	\	0	−135	\
	3	0	0	\	0	245	\
	4	−90	0	\	0	−300	\
	5	90	0	\	0	0	\
	6	0	0	−90	0	0	162
右臂	0	0	90	\	−110	0	\
	1	0	90	\	−315	0	\
	2	0	0	\	0	−170	\
	3	0	0	\	0	−175	\
	4	90	0	\	0	0	\
	5	−0	0	0	0	0	145

注：“耦合”指耦合分支．其中，角度参数单位为°，长度参数单位为 mm.

5.2　运动学参数标定方法数值仿真

为了验证本文提出的运动学参数标定方法的有效性，首先利用 Matlab 软件对机器宇航员运动学参数标定方法进行仿真验证．设定机器宇航员运动学角度参数误差为 ±0.05 rad（±2.86°），运动学长度参数误差为 ±5 cm，弯曲刚度为 5000 N · m^2/rad，扭转刚度为 5000 N · m^2/rad，末端负载质量设定为 20 kg．分别在考虑柔性变形影响与不考虑柔性变形影响 2 种情形下进行运动学参数标定.

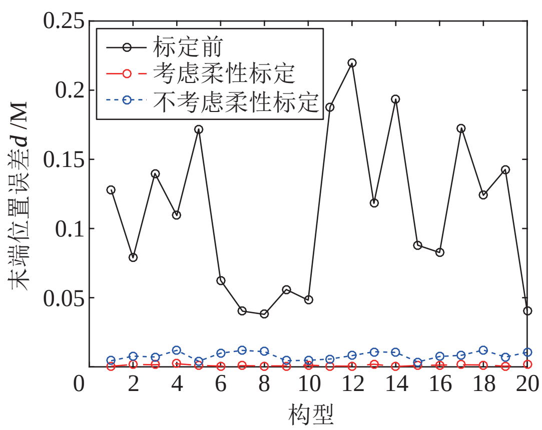

图 7　标定前后末端位置误差对比图

Fig.7　Comparison of the end-effector position error before and after calibration

标定前后末端位姿误差对比如图 7 和图 8 所示．图中横轴表示 20 组构型，纵轴表示末端三轴合成位置误差和姿态误差．每幅图中的 3 条曲线表示在标定前、考虑柔性变形标定后、不考虑柔性变形标定后 3 种情况下机器宇航员处于不同构型时的末端位置和姿态误差.

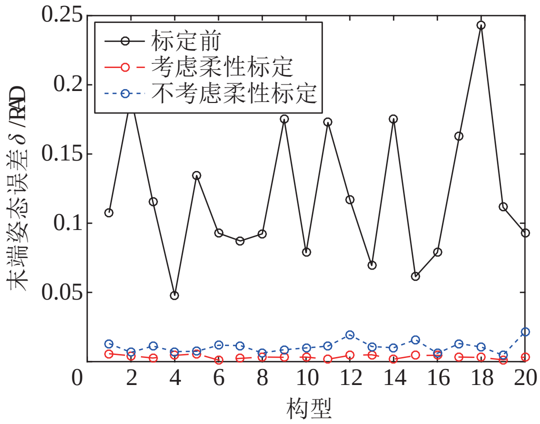

图 8　标定前后末端姿态误差对比图

Fig.8　Comparison of the end-effector attitude error before and after calibration

计算标定前后各构型末端三轴合成误差的平均值可以发现，若在不考虑柔性变形的情形下进行标定，末端位置误差平均可补偿 89.81%，末端姿态误差平均可补偿 89.31%；若在考虑柔性变形的情形下进行标定，末端位置误差平均可补偿 98.71%，末端姿态误差平均可补偿 96.47%．仿真结果表明，采用考虑柔性误差的运动学参数标定方法可以更有效地提高机器人末端位姿精度.

5.3　运动学参数标定方法实验验证

5.3.1　标定实验方法

由于耦合分支会对机器人手臂分支的操作精度产生影响，实验过程中首先标定耦合分支的运动学参数．考虑到该机器人的耦合分支仅有 2 个关节，长度较短，其末端位姿误差不易反映出运动学参数误差的影响，因此，在标定时锁死耦合分支以上的双臂关节，利用测量得到的双臂末端位姿标定耦合分支的运动学参数．耦合分支标定完成后，认为耦合分支不再对双臂末端位姿误差产生影响，以耦合分支的运动学参数为准确值进一步标定左、右臂运动学参数.

采用 Leica AT901-B 激光跟踪仪作为测量设备．测量过程中，利用激光跟踪仪仅能得到机器人末端位置数据，末端姿态角需要通过多个靶标的测量数据计算得到，具体方法为：

① 首先利用激光跟踪仪及配套软件系统建立机器人基坐标系 Σ_0；

② 构建辅助坐标系 Σ_A：在机器人末端固定 3

个不在同一直线上的靶标 A、B、C，测量 3 个靶标在基坐标系 Σ_0 下的位置坐标可得到向量 $\overrightarrow{AB}$、$\overrightarrow{AC}$，以 A 点为辅助坐标系原点，$\overrightarrow{AB}$ 方向为 X 轴，$\overrightarrow{AB}\times\overrightarrow{AC}$ 方向为 Z 轴，Y 轴可利用右手定则得到，将各矢量单位化即可得到 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{y}_{\mathrm{A}}$ 和 $\boldsymbol{z}_{\mathrm{A}}$；

③ 根据矢量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{y}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{z}_{\mathrm{A}}$ 可得到辅助坐标系相对于基坐标系的旋转矩阵 ${}^0_{\mathrm{A}}\boldsymbol{R}=[\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}},\boldsymbol{y}_{\mathrm{A}},\boldsymbol{z}_{\mathrm{A}}]$，再根据辅助坐标系原点位置坐标在基坐标系下的表示 ${}^0_{\mathrm{A}}\boldsymbol{P}=[\overrightarrow{OA}]^{\mathrm{T}}$ 可得到辅助坐标系相对于基坐标系的变换矩阵 ${}^0_{\mathrm{A}}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}{}^0_{\mathrm{A}}\boldsymbol{R} & {}^0_{\mathrm{A}}\boldsymbol{P}\\ \boldsymbol{0}_{1\times 3} & 1\end{bmatrix}$；

④ 以辅助坐标系为实际的工具坐标系，利用辅助坐标系相对于基坐标系的位姿数据即可进行标定.

5.3.2 实验数据分析

标定算法迭代 4 次即可收敛，标定后获得的运动学参数如表 2 所示.

表 2 三分支机器人 MCPC 参数标定值

Tab.2 Calibrated MCPC parameters of the three-branch robot

		α	β	γ	x	y	z
耦合	0	0.3	−0.2	0	1.5	−0.6	0
	1	−89.8	0	0	−1.9	−381.6	0
左臂	0	5.0	−90.1	0	113.5	10.2	0
	1	0	0	0	11.4	−136.3	0
	2	0.1	−0.4	0	13.4	−135.7	0
	3	89.7	5.1	0	−1.3	247.2	0
	4	−89.7	0	0	2.2	−298.9	0
	5	89.8	0.3	0	−3.2	0.4	0
	6	0.7	0.9	−89.2	−75.6	−70.2	255.9
右臂	0	0	89.9	0	−110.2	−0.9	0
	1	0	90.2	0	−315.4	−0.4	0
	2	0.03	0.1	0	13.4	−187.9	0
	3	−0.03	0.1	0	0.8	−169.7	0
	4	90.1	0	0	0.7	−1.0	0
	5	−50.3	41.2	39.7	−280.3	−109.8	164.7

注：“耦合”指耦合分支. 其中，角度参数单位为°，长度参数单位为 mm.

标定前后机器宇航员左、右臂末端三轴合成位姿误差的最大值和平均值如表 3 所示. 其中，位置误差单位为 mm，姿态误差单位为°.

标定前后机器宇航员末端位姿误差曲线如图 9 ～ 12 所示. 各图的横轴表示 20 组构型，纵轴表示末端三轴合成的位置误差和姿态误差. 每幅图中的 2 条曲线分别表示标定前和标定后机器宇航员处于不同构型下的末端位置和姿态误差.

表 3 标定前后末端位姿误差对比

Tab.3 Comparison of the end-effector pose error before and after calibration

末端误差		标定前		标定后	
		最大值	平均值	最大值	平均值
左臂	位置	20.6	16.1	5.7	2.5
	姿态	2.13	1.64	0.33	0.17
右臂	位置	16.3	15.6	3.7	2.3
	姿态	0.71	0.38	0.48	0.21

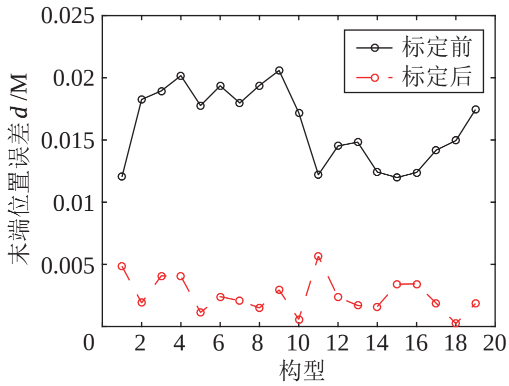

图 9 标定前后左臂末端位置误差对比图

Fig.9 Comparison of the end-effector position error of left arm before and after calibration

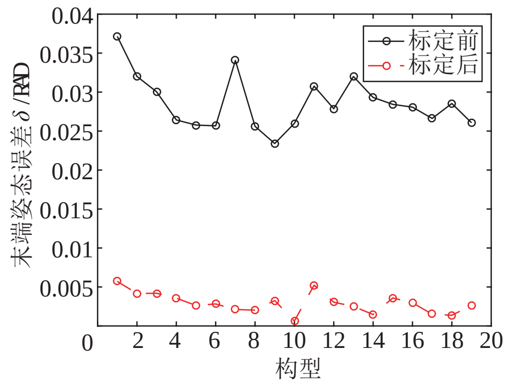

图 10 标定前后左臂末端姿态误差对比图

Fig.10 Comparison of the end-effector attitude error of left arm before and after calibration

根据图 9 ～ 12 以及表 3 的数据，由各构型标定前后平均误差的变化可计算得出，左、右臂末端位置精度分别提高了 84.5% 和 85.3%，左、右臂末端姿态精度分别提高了 89.6% 和 44.7%. 其中右臂的姿态误差仅补偿了 44.7%，这是因为右臂本身的姿态精度较高，补偿效果不够明显. 另外，标定后左、右臂末端位置精度虽然得到很大的改善，但仍有 2.5 mm 和 2.3 mm 的误差，这部分误差主要由关节角度误差和机器人刚度参数误差引起，还需通过

对机器宇航员的关节角度校正及柔性模型修正等手段进一步实现补偿.

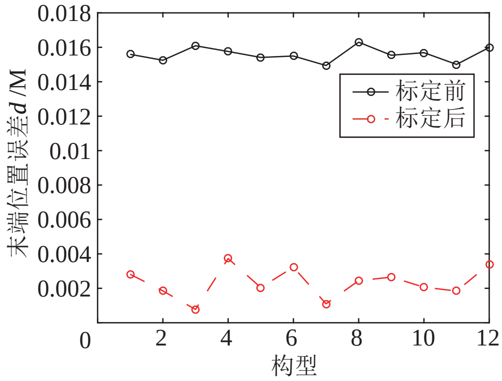

图 11　标定前后右臂末端位置误差对比图

Fig.11　Comparison of the end-effector position error of right arm before and after calibration

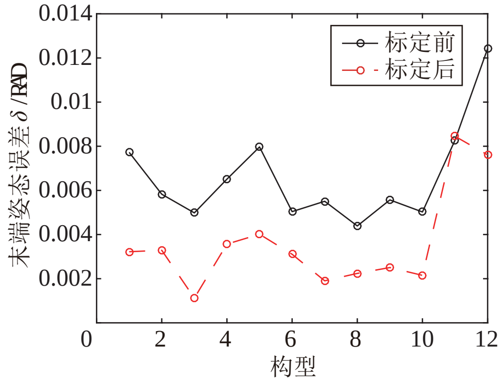

图 12　标定前后右臂末端姿态误差对比图

Fig.12　Comparison of the end-effector attitude error of right arm before and after calibration

6　结论（Conclusion）

本文提出一种基于 MCPC 模型的机器宇航员运动学参数标定方法．该方法针对机器宇航员的特殊结构，建立了综合考虑运动学参数误差与柔性误差的机器宇航员误差模型．在此基础上，设计了机器宇航员运动学参数标定方法，并以三分支机器人为研究对象进行了实验验证．实验结果证明了所设计的标定方法可以获得准确的运动学参数，并能有效提高机器宇航员的操作精度.

参考文献（References）

[1] 陈钢，贾庆轩，李彤，等．基于误差模型的机器人运动学参数标定方法与实验 [J]．机器人，2012，34(6)：680-688.
Chen G, Jia Q X, Li T, et al. Calibration method and experiments of robot kinematics parameters based on error model[J]. Robot, 2012, 34(6): 680-688.

[2] 刘志，赵正大，谢颖，等．考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿 [J]．机器人，2015，37(3)：376-384.
Liu Z, Zhao Z D, Xie Y, et al. Kinematic calibration and compensation for a robot with structural deformation[J]. Robot, 2015, 37(3): 376-384.

[3] Messay T, Ordóñez R, Marcil E. Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 33-48.

[4] 白云飞，丛明，杨小磊，等．基于 6 参数模型的 6R 串联机器人运动学参数辨识 [J]．机器人，2015，37(4)：486-492.
Bai Y F, Cong M, Yang X L, et al. Kinematic parameter identification for 6R serial robots based on a 6-parameter model[J]. Robot, 2015, 37(4): 486-492.

[5] Bonitz R G, Hsia T C. Calibrating a multi-manipulator robotic system[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1): 18-22.

[6] 李文广．双机器人标定方法研究及协调仿真 [D]．沈阳：沈阳理工大学，2011.
Li W G. Research of dual-robot calibration approaches and cooperative simulation[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011.

[7] Khalil W, Besnard S. Geometric calibration of robots with flexible joints and links[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 34(4): 357-379.

[8] Meggiolaro M A, Dubowsky S, Mavroidis C. Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(4): 415-427.

[9] Zhou J, Nguyen H N, Kang H J. Simultaneous identification of joint compliance and kinematic parameters of industrial robots [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(11): 2257-2264.

[10] Zhuang H Q, Wang L K, Roth Z S. Error-model-based robot calibration using a modified CPC model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1993, 10(4): 287-299.

[11] Lightcap C, Hamner S, Schmitz T, et al. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 452-456.

作者简介：

陈　钢（1982 –），男，博士，副教授．研究领域：空间机器人技术，机器人控制技术.

王　蕾（1994 –），女，硕士生．研究领域：空间机器人技术，机器人控制技术.