



基于 Denavit-Hartenbery 的高分辨 Kirkpatrick-Baez 镜成像结构设计与控制方法研究

摘要

针对在高等离子体 X 射线诊断中的 Kirkpatrick-Baez (KB) 高分辨显微控制较困难的问题, 基于 Denavit-Hartenbery (DH) 原理, 率先提出了双 5 自由度 KB 镜成像结构, 分析了双机械手的各个连杆坐标系和位姿结构的运动学方程, 从理论上分析双 5 自由度 KB 镜的像差. 在此基础上搭建双 5 自由度 KB 镜光路系统, 编制了 KB 镜控制流程, 并获取了清晰的十字成像. 实验结果表明, 该方法设计的双 5 自由度机械手控制方法可以实现 KB 镜的精确控制, 从而得到高精度分辨成像效果.

关键词

高分辨 KB 镜; 机器人手; 运动学; 像散

中图分类号 TH742

文献标志码 A

收稿日期 2019-11-12

资助项目 国家重点研发计划(2018YFB13066 02); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-msxmX0032); 重庆市中小学创新人才培养工程项目计划(CY190802); 重庆工商大学科研平台项目(KFJJ2016031, KFJJ2017052, KFJJ2017053)

作者简介

王洪建, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为激光与物质相互作用、机器人技术. whj_cqu@163.com

- 1 重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆, 400067
- 2 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆, 400030
- 3 重庆工商大学 计算科学与信息工程学院, 重庆, 400067

0 引言

1948 年, Kirkpatrick 和 Baez 最早设计的 KB 结构显微镜^[1], 其特点是通过子午和弧矢方向的像散补偿, 有效地解决了点对点成像的问题^[2]. 目前, 镀膜 KB 显微镜已广泛用于同步辐射^[3]. Seward 等^[4]于 1976 年最早将其应用在激光等离子体中诊断热等离子体成像和软 X 射线 $K\alpha$ 辐射, 之后 Gex 等^[5]配合条纹相机和 Richardson 等^[6]配合光栅谱仪进一步优化了 KB 镜的应用, 已在美国 OMEGA、Z-beamlet、NIF 激光器^[7-9]以及在法国 (LMJ) 装置^[10]上应用于惯性约束聚变 (ICF) 诊断. Hudec 将 KB 显微镜与“虾眼”结合应用并做了评述^[11]. Resta 等^[12]论证了基于 12 cm 长的抛物面嵌套 KB 显微镜. 在“神光 II”装置诊断中已建立了国内首套“四通道 KB+分幅相机”^[13]. 针对流体力学不稳定性增长、烧蚀演化、等离子体压缩均匀性等一系列 ICF 物理实验, 多色 KB 镜获得了丰富的表征等离子体温度和面密度的定量化诊断信息^[14].

KB 镜系统也是上海光源“梦之线”^[15]的关键部件, 直接影响到光束线的整体性能. 此外, KB 镜也是神光激光装置的重要诊断工具^[13-14], 以多层膜技术的 ICF 用 KB 显微镜的空间分辨率约 3~5 μm , 但掠入射角非常小, 只有 2°左右. 而我国“神光”系列 ICF 装置上的内爆成像诊断对 KB 显微镜的高光谱分辨和高空间分辨要求很高, 且单色光聚焦光斑尺寸非常小, KB 镜姿态对于聚焦光斑的大小至关重要. 因此, 对 KB 镜系统的设计、加工、安装和调试都提出了非常高的要求. 本文基于 KB 镜系统的设计, 提出了基于双 5 自由度结构和调试方法, 其中非球面 KB 镜系统由两块正交布置的掠入射椭圆柱面的反射镜构成, 分别在子午和弧矢方向实现聚焦, 可以为我国大装置高分辨诊断提供实验参考.

1 KB 显微镜设计

1.1 椭圆晶体 KB 显微成像系统结构理论

系统如图 1 所示: 前一块镜 M1 将水平面的 X 射线汇聚成一条竖直的线; 后一块镜 M2 再将竖直的线汇聚成一点. O_1 和 O_2 分别是它们

的顶点和坐标系 $x_1 \eta_1 z_1'$ 和 $x_2 \eta_2 z_2'$ 的原点, $O_0 O_1 O_2 O'$ 和 $S_0 \bar{P}_1 \bar{P}_2 S_1$ 分别是系统的基光线和主光线. $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ 分别表示 M1, M2 上的入射角和反射角, M1 和 M2 的中心距为 d , u_1 和 v_1 分别为光源 S_0 在垂直和水平方向的物方视场角, u_1' 和 v_1' 分别为垂直和水平方向的像方视场角. Σ_1, Σ_2 分别是 M1, M2 在像距为 γ_{m1}, γ_0 的像面, S_1 为主光线在 Σ_1 上的虚投影点, B_2 为基光线在 Σ_2 上的实投影点. 通过光学系统设计, 分析球面晶体 KB 显微镜的像散、像面倾斜、球差和彗差等像差, 探索物方视场与像面倾斜、球差和彗差的响应规律, 建立椭圆晶体 KB 显微成像系统的最佳像差校正方案.

由于两面镜子相互独立, 非耦合式, 且具有相同的聚焦模式, 所以两成像关系相互影响很小. KB 镜子午方向的聚焦方程为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{d+q} = \frac{2}{R_1 \sin \alpha_1}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{p+d} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R_2 \sin \alpha_2}, \quad (2)$$

式中: p 与 q 分别为光源到 M1 中心的物距和 M2 中心到理想像面的像距; R_1 和 R_2 分别为两镜面曲率半径, α_1 和 α_2 分别是物距和像距的入射角.

如果 KB 聚焦镜的两块镜子都是柱面, 弧矢方向没有聚焦能力, 两镜子各自独立在入射平面内对光束聚焦; 如果两块镜子中有一块是球面镜或两块都是球面镜, 需考虑弧矢方向的聚焦对第二块镜子子午聚焦的影响^[16].

1.2 KB 镜结构仿真

大视场晶体 KB 镜的准直控制与反馈系统是 KB 显微镜系统关键部分, 而前后两套 5 自由度多刚体复合结构, 有利于 KB 镜的微调, 即在底板上分别安装平移台 (Y 轴)、平移台 (X 轴)、旋转台 (Z 轴旋转)、升降台 (Z 轴) 和倾斜台 5 个活动部件, 在倾斜台上安装球面凹镜. 由图 2 可知, 该双 5 自由度平移台通过微调 5 维平移台各个方向的距离来达到改变光路, 达到优化成像的目的.

按照 Denavit-Hartenbery (DH) 坐标系^[17-18], 固定 KB 镜的支架可视作两套 5 自由度的机械手, 如图 2 所示. 根据空间矩阵的位姿关系, 5 自由度运动学方程如式 (3), 拟用 DH 表示法建立 KB 物镜、像镜的逆运动学方程, 推导支架各关节的位置及角度.

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5. \quad (3)$$

采用标准的 DH 坐标系, $\{i\}$ 的 z 轴与关节 $i+1$ 的轴线重合, x 轴沿两个关节 $i+1$ 与 $i+2$ 轴线的公垂线, 二者交点为原点, y 轴满足右手定则. 双系统则为两套 DH 算法复合, 连杆与相邻连杆之间的关系用 4 个参数表示, 即用来表示连杆的参数是连杆长度 a_i 和连杆扭角 α_i , 用来描述相邻连杆关系的参数是连杆距离 d_i 和连杆夹角 θ_i , 按照 DH 坐标系建立主要参数, 如表 1 所示.

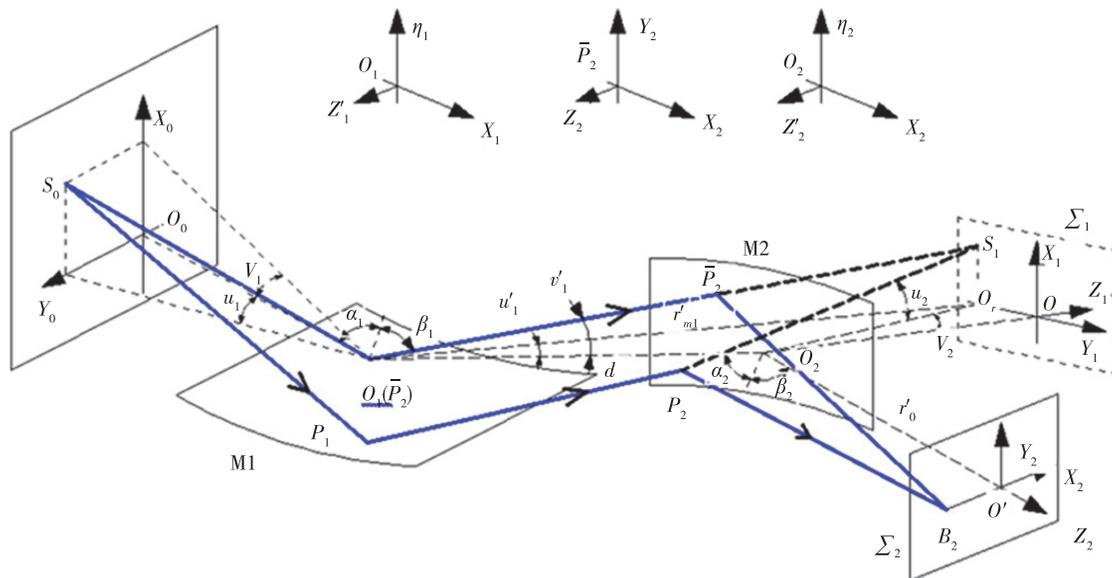


图 1 X 射线衍射晶体 KB 显微镜模型

Fig. 1 Model of X-ray diffraction KB crystal

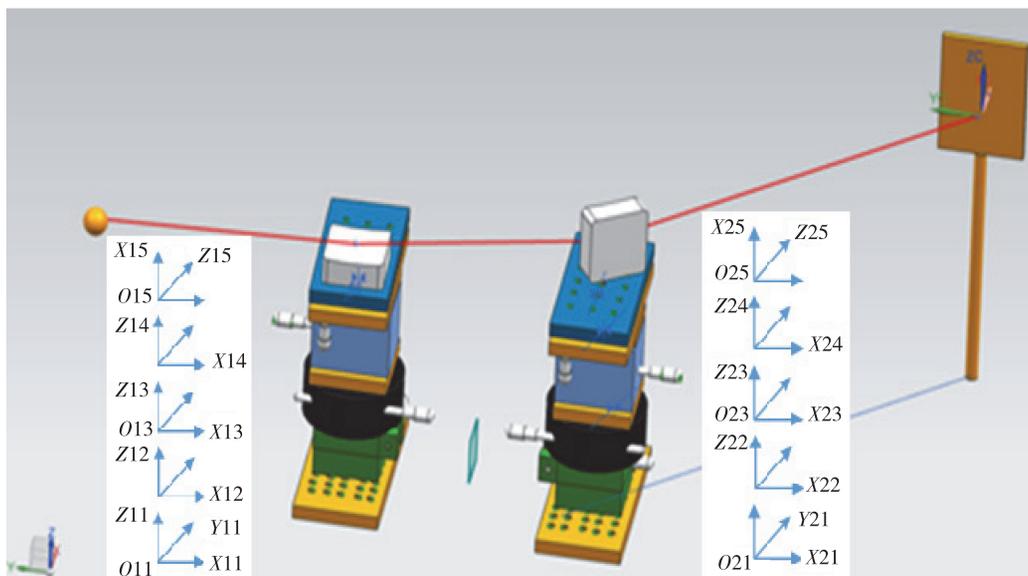


图2 球面KB镜多刚体复合运动示意图及DH坐标

Fig.2 Compound motion diagram of spherical KB mirror with multiple rigid bodies and DH coordinate

表1 5自由度机器人DH参数

Table 1 DH parameters of a five-degree-of-freedom robot

link	$\theta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	a/m	d/m	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$
1	0	0	a_1	0	1	0
2	θ	0	a_2	0	1	0
3	0	0	a_3	0	1	0
4	0	0	a_4	0	1	0
5	-90	90	0	d_4	0	1

KB镜视为5自由度机器人,其正问题是,给定平移台机器人各杆件的几何参数和关节变量,求解M1和M2末端连杆坐标系相对于基坐标系的位姿,即KB镜的前后镜.为建立运动学方程,用齐次变换矩阵 ${}^{i-1}_i\mathbf{T}$ 来表示连杆*i*坐标系在连杆*i-1*坐标系中的位姿关系,根据改进型DH算法,建立坐标系可得:

$${}^{i-1}_i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_i \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,s表示正弦函数sin,c表示余弦函数cos,本结构中,*i*值取1~5,依次可得:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & \alpha_2 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4_5\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \alpha_5 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

于是KB镜的每个镜面的运动学方程为:

$$\mathbf{T}_5 = {}^0_1\mathbf{T}_1 {}^1_2\mathbf{T}_2 {}^2_3\mathbf{T}_3 {}^3_4\mathbf{T}_4 {}^4_5\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} s\theta & c\theta & 0 & m \\ -c\theta & s\theta & 0 & n \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $m = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 c\theta + \alpha_4 c\theta + \alpha_5 c\theta$, $n = \alpha_3 s\theta + \alpha_4 s\theta + \alpha_5 s\theta$.

设物镜与像镜的距离为*d*,其在坐标系中与*x*,*y*,*z*的夹角分别为 α, β, θ ,于是平移算子:

$$\text{trans}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:满足 $\Delta x = d \cos \alpha$, $\Delta y = d \cos \beta$, $\Delta z = d \cos \gamma$.然后根据双5自由度进行计算,得到10自由度,假定 T_{M1} 与 T_{M2} 是M1和M2的5自由度运动方程,两者的空间距离为平移算子,按照右乘法则,推导出双5自由度的KB镜的复合运动方程为

$$T_{kb} = T_{M1} \text{trans}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) T_{M2}. \quad (7)$$

1.3 KB 镜光学仿真

运用 Zemax 软件进行仿真设计获得像差,根据表 2 中两个凹镜参数得到如图 3 所示的像差曲线.光线像差有 4 个变量: E_x 、 E_y 、 P_x 以及 P_y .可以看出在 0° 、 4° 、 8° 以及 12° 的视场 (OBJ) 中入瞳的大小几乎没怎么改变,但是像差的大小却随着视场角度的增大而逐渐增大.换句话说就是子午方向的成像质量随着视场角度的增大而逐渐变低.对弧矢方向进行分析,对比图 3 中 4 个视场 (OBJ) 在弧矢方向的像差图,可以看出随着视场角度的增大,像差逐渐减小,入瞳也逐渐减小,也就是说随着视场角度的增大,弧矢方向的成像质量也就越高.因为像差是有 x 和 y 分量的矢量(弧矢和子午),光线像差曲线不能完全描述像差,特别是平面倾斜或者系统是非旋转对称的.另外,像差曲线仅仅表示了通过光瞳的两个切面的状况,而不是整个光瞳.像差曲线图的主要目的是判断系统中有哪种像差,它不是整个系统性能的曲面描述,尤其系统是非旋转对称的.

2 实验结果

按照图 1 和图 2 的设计方案架设了双 5 自由度的实验平台,分别将两片 KB 镜片夹持在实验台上,参数如表 2 所示.验证实验的光源为 He-Ne 激光,成像物体为一个透光的光学十字.成像 CCD 的分辨率为 1280×960 、像素尺寸为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$.采用一个 4.5 倍激光扩束系统将激光束扩大至能完全照明成像物体.通过对光路的不断调整,获得物体经过

KB 镜后的清晰图像.其控制流程如图 4 所示,其中针尖和十字作为成像目标.

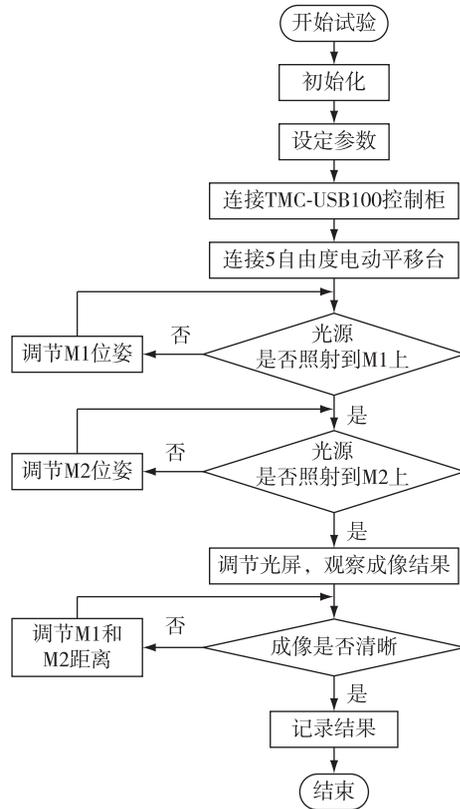


图 4 调节 KB 镜成像控制实验流程

Fig. 4 Flowchart of KB imaging control experiment

从图 5 可以看出,像在聚焦前有严重的像散问题,通过 KB 镜调节后去除了像散问题,得到了一个清晰完整的像.对比前后两图,可以看出聚焦对像散的消除有着重要的影响.通过针尖成像和光学十字

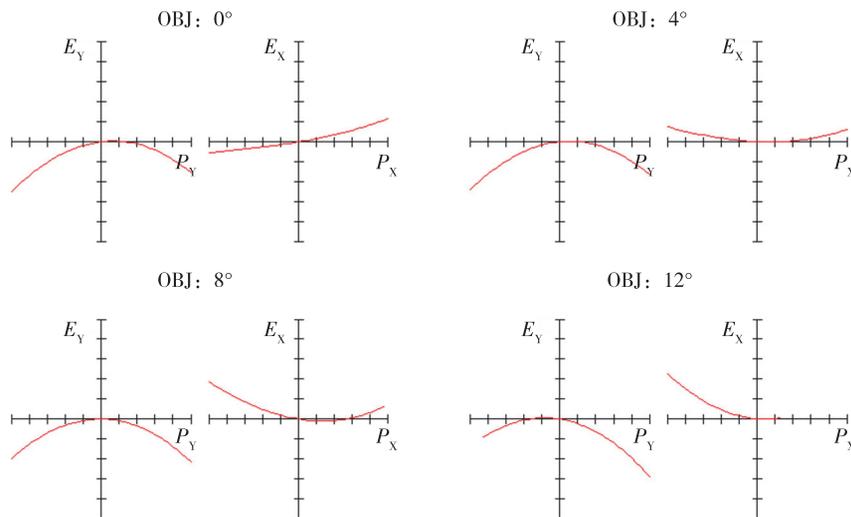


图 3 光线像差

Fig. 3 Ray aberration

成像这两次成像实验,验证了 KB 成像的可能性。

表 2 He-Ne 激光的 KB 镜实验参数

Table 2 Experimental parameters of KB mirror base He-Ne laser resource

参数	子午面(M1)	弧矢面(M2)
表面特征	抛光	抛光
表面镀金属	Al	Al
镜长/mm	50.8	50.8
焦距/mm	150	150
镜斜角/mrad	3	3
激光波长/nm	632.8	632.8



图 5 实验成像效果

Fig. 5 Image of experimental result

3 结论

针对微结构的成像,特别是弧矢面和子午面方向存在相差,KB 镜难以控制的问题,本文设计了双 5 自由度 KB 结构和控制方法,给出了其关键部件 KB 镜的 DH 算法姿态调节方案,分析了 5 自由度多刚体复合调节过程,给出了微聚焦系统的整体设计方案.利用仿真软件对 KB 镜成像进行了仿真,分析了像散和光程差,搭建了双 5 自由度 KB 镜实验平台,编制了双 5 自由度控制算法和流程,结合 He-Ne 激光光源和 CCD 图像采集器,获得了清晰的十字图像,从而验证了双 5 自由度 KB 镜结构和控制能够获得高分辨图像,可以为高能 X 射线诊断提供参考.

参考文献

References

[1] Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by

X-rays [J]. Journal of the Optical Society of America, 1948, 38(9) : 766-774

[2] Mimura H, Kimura T, Yokoyama H, et al. An adaptive optical system for sub-10 nm hard X-ray focusing [J]. Proc of SPIE, 2010, 7803 : 780304

[3] Dabin Y, Rostaing G, Hignette O, et al. The present state of Kirkpatrick-Baez mirror systems at the ESRF [J]. Proc of SPIE, 2002, 4782 : 235-245

[4] Seward F, Dent J, Boyle M, et al. Calibrated "four-color" X-ray microscope for laser plasma diagnostics [J]. Review of Scientific Instruments, 1976, 47(4) : 464-470

[5] Gex J P, Fleuret N, Sauneuf R. Moyens de diagnostic pour l'étude spatio-temporelle de l'émission X d'un plasma créé par laser [J]. Revue De Physique Appliquée, 1977, 12(7) : 1049-1053

[6] Richardson M, Marjoribanks R, Letzring S, et al. Spectrally discriminating time-resolved and space-related X-ray plasma diagnostics [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(12) : 1861-1869

[7] Marshall F J, Oertel J A. A framed monochromatic X-ray microscope for ICF (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1) : 735-739

[8] Bennett G R, Landen O L, Adams R F, et al. X-ray imaging techniques on Z using the Z-Beamlet laser [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1) : 657-662

[9] Pickworth L, Hammel B, Smalyuk V, et al. Measurement of hydrodynamic growth near peak velocity in an inertial confinement fusion capsule implosion using a self-radiography technique [J]. Physical Review Letters, 2016, 117(3) : 035001

[10] Champeaux J, Troussel P, Boutin J Y, et al. Systèmes d'imagerie à haute resolution dans le domaine des Rayons X pour le Laser Mégajoule [J]. Journal De Physique IV (Proceedings), 2006, 138(1) : 285-295

[11] Hudec R. Kirkpatrick-Baez (KB) and lobster eye (LE) optics for astronomical and laboratory applications [J]. X-Ray Optics and Instrumentation, 2010, 2010 : 1-39

[12] Resta G, Khaykovich B, Moncton D. Nested Kirkpatrick-Baez (Montel) optics for hard X-rays [J]. Journal of Applied Crystallography, 2015, 48(2) : 558-564

[13] Yi S Z, Mu B Z, Wang X, et al. Multi-energy four-channel Kirkpatrick-Baez microscope for X-ray imaging diagnostics at the Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9) : 093401

[14] 曹柱荣, 丁永坤, 董建军, 等. X 射线高空间分辨多色显微成像系统研制及应用 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3) : 32013

CAO Zhurong, DING Yongkun, DONG Jianjun, et al. Researches and applications of X-ray high-spatial-resolution multi-energy microscope system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3) : 32013

[15] 陈家华, 龚学鹏, 薛松, 等. 软 X 射线光发射电子显微镜光束线聚焦用 KB 镜系统 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(11) : 2810-2816

CHEN Jiahua, GONG Xuepeng, XUE Song, et al. KB mirror system of X-ray photo-emission electron microscope beamline [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(11) : 2810-2816

- [16] 祝德充,岳军会,随艳峰,等.KB 镜束流截面测量系统研制[J].强激光与粒子束,2018,30(4):142-146
ZHU Dechong, YUE Junhui, SUI Yanfeng, et al. Development of beam profile monitor using Kirkpatrick-Baez mirrors[J].High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(4):142-146
- [17] Shah S V, Saha S K, Dutt J K. Denavit-hartenberg parameterization of Euler angles[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7(2):021006
- [18] 王智兴,樊文欣,张保成,等.基于 Matlab 的工业机器人运动学分析与仿真[J].机电工程,2012,29(1):33-37
WANG Zhixing, FAN Wenxin, ZHANG Baocheng, et al. Kinematical analysis and simulation of industrial robot based on Matlab[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(1):33-37

Denavit-Hartenbery based image design and control method of high resolution Kirkpatrick-Baez mirror

WANG Hongjian¹ XIAO Shali² LIN Rui³ JIANG Yunyun¹

¹ Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control,

Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067

² Key Laboratory of Opto-electronic Technology and System, the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030

³ School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067

Abstract In view of the difficult situation of Kirkpatrick-Baez (KB) high-resolution micro-control in high-energy plasma X-ray diagnosis, a new method of realizing high-resolution micro-control based on Denavit-Hartenbery (DH) coordinate system is proposed. In this structure, the front and rear lenses of the KB microscope are used as the rigid manipulator with double 5 degrees of freedom (DOF) respectively to realize the control of the double 5-DOF. The new method is modeled theoretically and the kinematic equations of each linkage coordinate system and structure of the two manipulators are analyzed. The optical system of the double 5-DOF manipulator is built, and the proposed KB mirror control method is verified by experiments. The experimental results show that the double 5-DOF manipulator designed can realize the precise control of the KB mirror and obtain high precision resolution imaging effect.

Key words high resolution KB mirror; robotic hand; kinematics; astigmatism