光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022082201

基于弹性形变摩擦力的光学天线伺服系统建模

林贻翔[1*]，吴世奇[1,2]

（1. 中国电子科技集团公司第十研究所，成都 610036；
2. 电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室，成都 611731）

摘　要： 提出了一种弹性形变摩擦力模型，用于描述光学天线伺服系统的非线性效应。弹性形变摩擦力模型将摩擦力表示为相对运动物体表面接触形变产生的弹性力，与Stribeck模型相比，弹性形变在相对运动过程中连续变化，消除了零速度摩擦力不连续性，与LuGre模型相比，参数较少且无需求解微分方程，降低了模型辨识难度。以伺服系统模型输出速度与实测输出速度的误差平方和为评价函数，采用遗传算法辨识基于三种摩擦力模型的伺服系统参数。实验结果表明：在相同的遗传进化迭代次数下，弹性形变摩擦力模型精度比Stribeck模型提高2.3倍，比LuGre模型提高4.6倍。验证了弹性形变摩擦力模型用于伺服系统非线性建模的可行性。

关键词： 非线性模型；摩擦力；光学天线；遗传算法；弹性形变

中图分类号： TH117.1；TP273　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0103－06

Modeling of Optical Antenna Servo System Using Elastic Deformation Friction Torque

LIN Yixiang[1]，WU Shiqi[1,2]

（1. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation，Chengdu 610036，CHN；
2. National Key Lab. of Science and Technology on Communications of UESTC，Chengdu 611731，CHN）

Abstract： In order to realize nonlinear model identification of optical antenna servo system，an elastic deformation friction model is proposed to describe the nonlinear effect of the system The elastic deformation friction model considers that the friction force is originated by the elastic deformation of the asperities of the contacting surfaces. The contact behaves as a spring，and the contact deformation changes continuously during relative motion eliminating the discontinuity at zero velocity of Stribeck model. Compared with the LuGre model，this model has fewer parameters and does not need to solve differential equations，which reduces the difficulty of parameter identification. Then，the parameter identification of the three models is realized by using the genetic algorithm with the square sum of the error between the model and the measured data of servo system as the evaluation function. Experimental results indicate that：under the same genetic evolution process，the accuracy of the elastic deformation friction model is 2.3 times higher than that of the Stribeck model，and 4.6 times higher than that of the LuGre model. The results verify the feasibility of the elastic deformation friction model for nonlinear modeling of servo system.

Key words： nonlinear model；friction；optical antenna；genetic algorithm；elastic deformation

收稿日期：2022－08－22.
基金项目：中国电科技术创新基金项目(KJ1902004)；
国防基础科研计划项目(JCKY2020210C020).
* **通信作者：**林贻翔　**E-mail：**linix@whu.edu.cn

0 引言

无线激光通信具有大带宽和高定向性特点，在移动平台高速率、抗干扰通信领域具有应用前景。激光通信系统通常由光通信端机和光学天线组成，其中光通信端机实现信息在光波上的调制解调和编解码功能[1]；光学天线实现激光光束的发射接收和捕获跟踪对准功能[2]。由于光学相控阵技术还未成熟，光学天线主要采用机械式伺服转台作为控制光束方向的执行机构，实现移动平台间的光束对准。

激光光束的高定向性要求光学天线具有很高的跟踪精度。由于静摩擦力远大于滑动摩擦力，光学天线伺服机构在零速度附近表现出非线性效应，因此采用梅森(Mason)增益公式得到的线性系统模型难以精确地表征实际系统特性，还需要进一步考虑摩擦力造成的非线性影响，从而为精密跟踪系统设计提供可靠的依据。

摩擦是一种高度复杂的现象，许多研究人员对其进行了几个世纪的研究，一系列研究模型可归类为静态摩擦力和动态摩擦力[3-5]。带有静摩擦的库仑模型是最早的静态摩擦力模型，将摩擦力描述为物体相对运动时的滑动摩擦力(库仑摩擦)和相对静止时更高的静摩擦力。Stribeck 研究了滑动摩擦力与静摩擦力之间的过渡过程，将摩擦力描述为随着相对速度的减小从滑动摩擦力连续增大为静摩擦力，改进了从库仑摩擦到静摩擦的突变过程。静态摩擦力模型主要描述摩擦力的稳态行为，由于摩擦力取决于相对速度的方向，当相对速度为零时，这一类模型中的大多数都表现出摩擦力的不连续性，需要如文献[6-7]中增加方程来描述零速度有限斜率，解决零速度下的摩擦力多值问题。动态摩擦力模型基于接触表面之间的物理相互作用，通过引入额外的状态变量，与速度一起用于评估摩擦力，从而获取更多的摩擦属性。例如 LuGre 模型，采用状态变量表征接触面的平均形变，将摩擦力描述为相对速度和形变的函数，可以准确模拟两个表面之间相对速度消失，摩擦力增加导致的粘附和滑动(Stick and Slip)状态之间的过渡。

对于机械系统仿真所采用的摩擦力模型的选择，建立仿真参数的容易程度至关重要。不论是静态摩擦力模型通过增加方程，还是动态摩擦力模型通过增加变量来更准确地描述摩擦力，都提高了模型参数辨识的难度。本文提出一种基于弹性形变的摩擦力模型，相比静态摩擦力模型，消除了 Stribeck 模型零速度不连续性，且无需像文献[6-7]增加多余的方程；相比动态摩擦力模型，增加的参数比 LuGre 模型少。采用遗传算法辨识模型参数，对比分析了弹性形变摩擦力、Stribeck 和 LuGre 三种模型的建模误差，验证了提出的弹性形变摩擦力可以解决零速度下摩擦力的不连续性问题，实现光学天线伺服系统的准确建模。

1 系统模型

1.1 光学天线伺服系统模型

光学天线采用单摆镜结构设计，如图 1 所示，通过伺服电机驱动单摆镜转动，控制激光光束方向，实现对目标终端的实时跟踪对准。

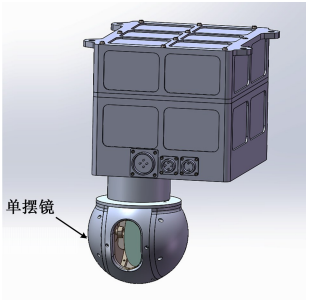


图 1 光学天线三维外形结构图

图 2 为光学天线伺服系统模型框图[8]。电机驱动器设置为速度控制模式。图 2 中 v_d 为电机输入角速度命令(rad/s)，v 为电机实际输出角速度(rad/s)，$\dot{v}$ 为角加速度(rad/s^2)。K_u 为功率放大倍数，K_b 为反电动势常数(V/(rad/s))，R 为电枢电阻(Ω)，I 为电枢电流(A)。K_t 为转矩常数(N·m/A)，J 为转动惯量(kg·m^2)。T 为电机驱动力矩(N·m)，T_R 为最后输出到负载上的合力矩(N·m)，T_f 为摩擦力矩(N·m)。图 2 中假设电流环调节到理想状态，用常数 $1/R$ 近似，忽略电枢电感的影响；速度环采用 PI 控制器，K_p 和 K_i 分别为比例和积分控制参数。

根据图 2，伺服系统模型微分方程写为

$$J\dot{v}=-\frac{K_bK_t}{R}v+\frac{K_uK_t}{R}(K_p(v_d-v)+K_i\int(v_d-v))-T_f \tag{1}$$

1.2 摩擦力模型

图 2 中的摩擦力矩模型是伺服系统中的非线性部分，分别采用 Stribeck、LuGre 和本文提出的弹性

形变摩擦力三种模型进行建模分析。

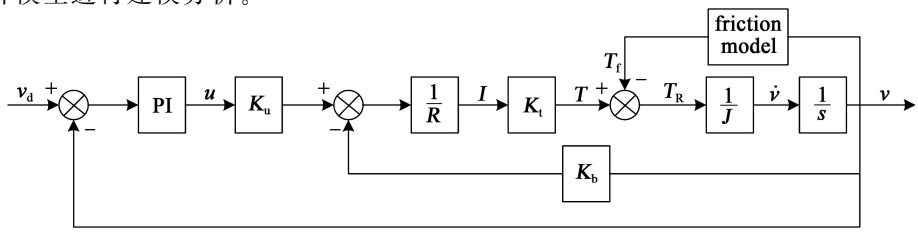


图 2　伺服系统模型框图

1.2.1　Stribeck 模型

Stribeck 模型是一种广泛使用的静态摩擦力模型[9]。与带有静摩擦的库仑模型相比，Stribeck 摩擦力从静摩擦到滑动摩擦的减小是一个连续的过程，因此相对运动期间的摩擦力矩表示为速度的连续函数：

$$T_f=\begin{cases}\min(|T|,T_s)\operatorname{sgn}(T) & |v|=0\\ (T_c+(T_s-T_c)e^{-(|v|/v_s)^2})\operatorname{sgn}(v)+F_v v & |v|\neq 0\end{cases} \tag{2}$$

其中，T_s 为最大静摩擦力矩，T_c 为滑动摩擦力矩，T 为驱动力矩，v 为相对速度，v_S 表示 Stribeck 特征速度，F_v 为粘性摩擦系数，sgn 为符号函数，min 为取最小值函数。

Stribeck 模型在零速度下呈现摩擦力的不连续性，因为力取决于相对速度的方向。这种不连续性会在系统响应中引入数值不稳定性，是动态建模和仿真中需要避免的。

1.2.2　LuGre 模型

LuGre 模型是一种广泛使用的动态摩擦力模型[10-11]。该模型假设相对运动的物体表面凹凸不平产生大量接触，摩擦力来源于表面接触的相互作用，引入状态变量 z 表示表面接触的平均形变，定义摩擦力矩为

$$\begin{cases}T_f=\sigma_0 z+\sigma_1\dot{z}+F_v v\\ \dot{z}=v-\dfrac{|v|}{g(v)}\sigma_0 z\\ g(v)=T_c+(T_s-T_c)e^{-(|v|/v_s)^2}\end{cases} \tag{3}$$

式中，σ_0 为接触刚度，σ_1 为阻尼系数，用于稳定粘附状态向滑动状态(stick-slip)过渡的摩擦力。

当系统达到稳态时($\dot{z}=0$)，LuGre 模型与静摩擦模型一致；同时通过新的状态变量引入了预滑动变形(pre-sliding displacement)，从而消除了零速度下的不连续性。

1.2.3　弹性形变摩擦力模型

参考 Stribeck 效应和 LuGre 模型接触形变，提出一种弹性形变摩擦力模型。设表面接触的平均形变为 z，定义摩擦力为形变产生的弹性力，如下式：

$$\begin{cases}T_f=k_0 z\\ z_t=\dfrac{|T|}{k_1}\\ z=z_c\operatorname{sgn}(v)+(\min(z_t,z_s)\operatorname{sgn}(T)-z_c\operatorname{sgn}(v))e^{-(|v|/v_s)^2}\end{cases} \tag{4}$$

其中，k_0 为摩擦力弹性系数，k_1 为驱动力弹性系数，z_t 为相对静止状态下驱动力矩 T 预期产生的形变，z_s 为相对静止状态下的最大静摩擦形变，z_c 为相对运动状态下的滑动摩擦形变。

从式(4)可以看出，物体相对运动过程中表面接触形变 z 在 z_c 与 z_s 之间遵循 Stribeck 变化规律，产生的弹性力 $k_0 z_c$ 和 $k_0 z_s$ 分别对应滑动摩擦力矩 T_c 和最大静摩擦力矩 T_s。具体变化过程如下：当相对速度 v 不为零时，接触形变 z 的大小为 z_c，对应滑动摩擦力矩；当相对速度趋近零时，z 以 Stribeck 变化规律趋近驱动力预期产生的形变 z_t，直至 z_t 等于 z_s，形变 z 达到最大形变 z_s，对应最大静摩擦力矩；当驱动力继续增大，z_t 大于 z_s，表面接触断裂，物体开始滑动，相对速度 v 从零开始增大，接触形变 z 从 z_s 以 Stribeck 变化规律趋近 z_c，对应的摩擦力从最大静摩擦力矩趋近滑动摩擦力矩。

考虑到接触形变 z 趋近 z_s 和趋近 z_c 可能遵循不同变化曲线，因此采用两个参数表示 Stribeck 特征速度

$$v_s=\begin{cases}v_{s1} & T\cdot v<0\\ v_{s2} & T\cdot v\geqslant 0\end{cases} \tag{5}$$

从上述物体相对运动过程可知，表面接触弹性形变 z 的连续变化保证了摩擦力矩的连续变化。

2　模型辨识算法设计

伺服系统非线性模型参数求解没有确定的步

骤，因此采用遗传算法进行模型参数辨识。将模型参数编码为染色体，由多个染色体个体组成种群，父代通过杂交和变异得到子代，并根据优胜劣汰的选择机制产生新的种群，随着种群一代代进化逐渐产生适应值高的优秀个体，对应参数解的质量不断提高，从而实现在参数空间并行搜索合适的模型参数使得模型误差最小，算法设计[12-13]如下。

(1)染色体编码

模型参数是连续变量，因此采用实数编码将模型参数直接编码为种群中个体的染色体。基于Stribeck摩擦模型的伺服系统待辨识参数编码为8个基因的染色体：$p=(p_1,p_2,\cdots,p_8)=(J,K_bK_t/R,K_uK_tK_p/R,K_uK_tK_i/R,T_s,T_c,v_s,F_v)$。基于LuGre摩擦模型的伺服系统待辨识参数编码为10个基因的染色体：$p=(p_1,p_2,\cdots,p_{10})=(J,K_bK_t/R,K_uK_tK_p/R,K_uK_tK_i/R,T_s,T_c,v_s,F_v,\sigma_0,\sigma_1)$。基于弹性形变摩擦模型的伺服系统待辨识参数编码为带有9个基因的染色体：$p=(p_1,p_2,\cdots,p_9)=(J,K_bK_t/R,K_uK_tK_p/R,K_uK_tK_i/R,T_s,T_c,v_{s1},v_{s2},k_0/k_1)$。

(2)适应值函数

在输入相同的电机速度命令驱动下，设$(x_1,x_2,\cdots,x_n)$为1～n个时刻的伺服电机实测输出速度，$(y_1,y_2,\cdots,y_n)$为1～n个时刻的模型输出速度。通过模型速度输出值与实测速度输出值之间的误差来评价个体的优劣，定义适应值函数为

$$F=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2} \tag{6}$$

模型值与实测值误差越小，适应值越大，表示个体越优秀，对应辨识的模型参数质量越优。

(3)选择

选择指从旧种群中选择适应值大的个体产生新种群的过程。设种群数量为M，第m个个体适应值为F_m，个体选择概率与适应值成正比，则第m个个体被复制个数的期望值为

$$f_m=\frac{F_m}{\sum_{m=1}^{M}F_m}M \tag{7}$$

根据期望值f_m的整数部分选择出N个个体($N<M$)；根据期望值的小数部分，按从大到小排序，选择出$M-N$个个体，得到新的M个个体作为新种群。该方法保证了每个染色体在下一代中被复制的个数与期望值近似相等，即赋予优秀个体更大的选择概率；同时通过排序选择部分适应值差的个体，抑制算法早期个别超级染色体的大量复制，达到限制竞争、保护种群多样性的目的。

(4)遗传算子

遗传算子分为杂交算子和变异算子。杂交算子通过两个父代染色体交换等位基因得到新的子代，设有n个实数编码基因，则根据杂交概率在2^n个不同染色体组合中随机产生子代。变异算子根据变异概率随机选择染色体某位基因赋予定义区间的随机值，得到变异后代。杂交算子执行局部有向搜索，寻找局部最优解，变异算子执行随机搜索，寻找全局最优解，从而实现遗传算法的高效搜索。

3 实验与结果

以1 Hz正弦信号作为输入速度命令，测量伺服电机的实际输出速度，对比分析Stribeck模型、LuGre模型和弹性形变摩擦力模型输出速度与电机实测输出速度的符合程度。

设置遗传种群大小$M=100$，最大遗传代数$G=500$，杂交概率$P_c=0.9$，变异概率$P_m=0.1$，得到三种模型的遗传算法进化过程如图3所示，其中黑色点线为Stribeck模型，蓝色实线为LuGre模型，红色虚线为弹性形变摩擦力模型。适应值随着进化过程不断提高，即模型误差逐渐减小，在相同的遗传进化迭代次数下，弹性形变摩擦力模型精度比Stribeck模型提高2.3倍，比LuGre模型提高4.6倍。最终得到模型参数辨识结果如表1所示。

根据表1参数辨识结果画出三种模型速度响应曲线与伺服电机实测速度响应曲线，如图4，其中黑色点线为输入速度命令，红色实线为实测输出速度，蓝色虚线为模型输出速度。在速度过零部分，实测速度响应曲线呈现明显的非线性。对比三种模型响

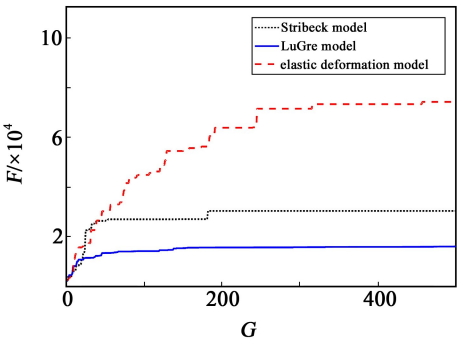


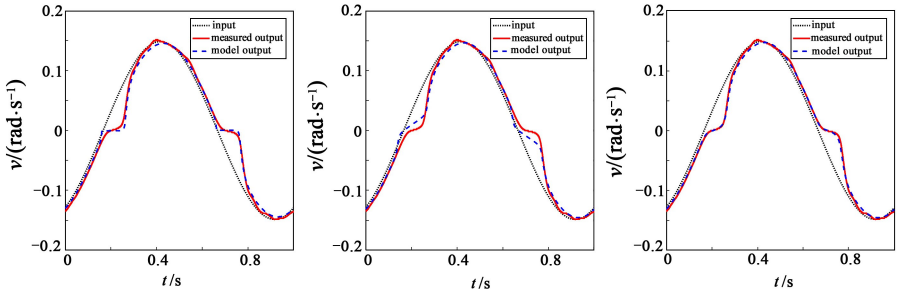
图3 三种模型遗传算法适应值进化曲线

表 1　参数辨识结果

模型参数	Stribeck	LuGre	弹性形变摩擦力
J	0.46	0.69	0.50
K_bK_t/R	0.017 1	0.008 4	0.022 0
$K_uK_tK_p/R$	33.85	49.54	36.89
$K_uK_tK_i/R$	2.95	4.37	3.29
T_s	2.35	1.95	2.48
T_c	0.10	0.10	0.09
v_s	0.012 8	0.017 8	$v_{s1}=0.010\,8$，$v_{s2}=0.035\,5$
F_v	0.08	0.05	
σ_0		190.30	
σ_1		105.95	
k_0/k_1			0.95

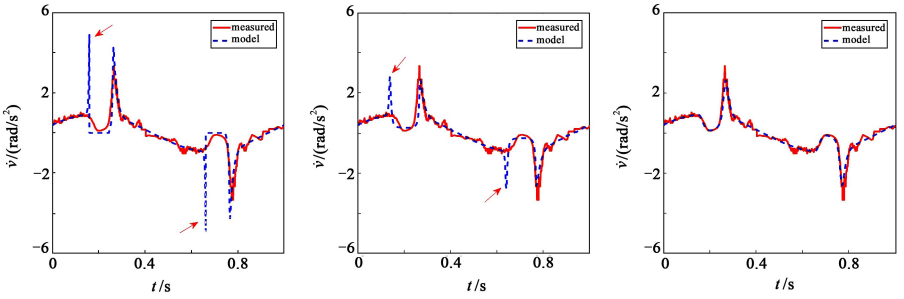
应曲线可以看出：图 4(a)中 Stribeck 模型在零速度附近产生不连续性；图 4(b)中 LuGre 模型实现了速度过零时的平滑过渡，但由于模型参数更多，辨识难度大，导致未搜索到更优的参数，在零速度附近仍有较大误差；图 4(c)中弹性形变摩擦力模型在整个周期与实测速度均符合得很好，更准确地模拟了伺服系统的非线性效应。

将图 4 中实测电机速度曲线微分得到电机的加速度曲线，如图 5 中红色实线，同时画出三种模型输出的加速度曲线(蓝色虚线)进行对比分析。可以看出，图 5(a)中 Stribeck 模型和图 5(b)中 LuGre 模型在速度趋近零的时候，加速度突然增大(如图 5(a)，(b)中箭头标示)，与实测加速度不符；图 5(c)中弹性形变摩擦力模型加速度在整个周期均与实测加速度相符合。



(a) Stribeck 模型　　(b) LuGre 模型　　(c) 弹性形变摩擦力模型

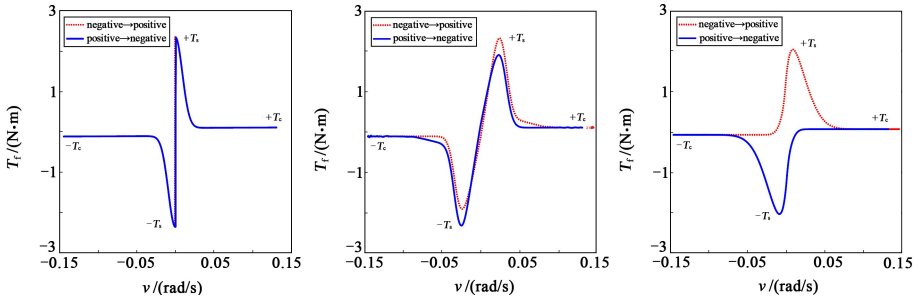
图 4　模型输出速度与实测电机输出速度对比



(a) Stribeck 模型　　(b) LuGre 模型　　(c) 弹性形变摩擦力模型

图 5　模型加速度与实测加速度对比

图 6 画出三种模型摩擦力矩与速度的关系，其中红色点线为从负速度到正速度过程中的摩擦力矩变化曲线，蓝色实线为从正速度到负速度过程中的摩擦力矩变化曲线。以负速度到正速度过程为例，图 6(a)中 Stribeck 摩擦力矩先随着速度趋近零从$-T_c$增大到$-T_s$，再随着速度从负到正突变为$+T_s$，



(a) Stribeck 模型　　(b) LuGre 模型　　(c) 弹性形变摩擦力模型

图 6　摩擦力矩与速度的关系

最后随着速度增大从$+T_s$减小为$+T_c$。图6(b)中LuGre摩擦力矩变化趋势与Stribeck模型一致，不同之处在于零速度附近摩擦力矩从$-T_s$～$+T_s$无限斜率的突变改进为有限斜率的渐变，消除了零速度下的不连续性。由于电机合力矩$T_R = T - T_f$，Stribeck和LuGre摩擦力矩在速度趋近零时从$-T_c$增大到$-T_s$，则T_R从$T+T_c$增大为$T+T_s$，导致图5(a)、(b)中箭头标示的加速度突然增大，与实测加速度不符，从而最终影响模型输出速度与实测速度之间的误差。图6(c)中弹性形变摩擦力矩随着速度趋近零从$-T_c$逐渐增大到T_s，则合力矩从$T+T_c$减小为$T-T_s$，从而加速度的变化规律与实测值相符。因此，弹性形变摩擦力矩加速度与速度均与实测值保持了高度的一致性。

4 结论

针对光学天线伺服系统受摩擦力影响导致电机速度呈现非线性效应的问题，参考Stribeck效应和LuGre模型接触形变，提出了一种弹性形变摩擦力模型，将摩擦力描述为表面接触形变产生的弹性力。滑动时接触形变最小，产生的弹性力为滑动摩擦力；静止时接触形变随着驱动力增大而增大，最大形变产生的弹性力为最大静摩擦力。接触形变在相对运动过程中连续变化保证了摩擦力的连续变化，相比Stribeck模型，消除了零速度下的不连续性，相比LuGre模型，参数更少，且无需求解微分方程，降低了参数辨识难度。采用遗传算法实现三种模型的参数辨识，以模型输出速度响应曲线与实测电机输出速度响应曲线之间的误差平方和为评价标准，在相同的遗传进化迭代次数下，弹性形变摩擦力模型精度比Stribeck模型提高2.3倍，比LuGre模型提高4.6倍。Stribeck模型在零速度时产生不连续性，而弹性形变模型和LuGre模型均实现了零速度时的平滑过渡。但由于LuGre模型参数更多，未搜索到更优的参数，在零速度附近仍有较大误差，导致整体曲线的符合程度比Stribeck模型差。弹性形变模型在整个周期与实测值均符合得很好，验证了本文提出的弹性形变摩擦力模型可以有效地模拟伺服系统的非线性效应。

参考文献：

[1] 兰 枫，韩 婷，郭精忠. 空间激光通信高速多制式光调制技术[J]. 半导体光电，2020，41(6)：884-888.
Lan Feng，Han Ting，Guo Jingzhong. Multi-format optical modulation technique with high bit rate for space laser communication[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(6)：884-888.

[2] 张兴亮，王 威，吴佳彬. 激光通信系统中快速反射镜控制技术研究[J]. 半导体光电，2021，42(2)：289-294，300.
Zhang Xingliang，Wang Wei，Wu Jiabin. Research on fast steering mirror control technology of laser communication system[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(2)：289-294，300.

[3] Marques F，Flores P，Claro J C P，et al. A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems[J]. Nonlinear Dynamics，2016，86：1407-1443.

[4] Jaiswal S，Sopanen J，Mikkola A. Efficiency comparison of various friction models of a hydraulic cylinder in the framework of multibody system dynamics[J]. Nonlinear Dynamics，2021，104：3497-3515.

[5] Marques F，Flores P，Claro J C P，et al. Modeling and analysis of friction including rolling effects in multibody dynamics：A review[J]. Multibody System Dynamics，2019，45：223-244.

[6] Wojewoda J，Stefański A，Wiercigroch M，et al. Hysteretic effects of dry friction：modelling and experimental studies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A，2008，366：747-765.

[7] Andersson S，Söderberg A，Björklund S. Friction models for sliding dry，boundary and mixed lubricated contacts[J]. Tribology International，2007，40：580-587.

[8] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. (第4版) 北京：电子工业出版社，2016.
Liu Jinkun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. 4th edition. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2016.

[9] Xiang W，Yan S，Wu J. Dynamic analysis of planar mechanical systems considering stick-slip and Stribeck effect in revolute clearance joints[J]. Nonlinear Dynamics，2019，95：321-341.

[10] 武诗睿，吴 丹. 基于摩擦力矩-速度曲线特定区域形状分析的LuGre摩擦参数辨识[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2022，62(9)：1500-1507.
Wu Shirui，Wu Dan. Parameter identification for the LuGre friction model based on an area-specific shape analysis of the friction torque-velocity curve[J]. J. of Tsinghua University (Science and Technology)，2022，62(9)：1500-1507.

[11] Marques F，Woliński L，Wojtyra M，et al. An investigation of a novel LuGre-based friction force model[J]. Mechanism and Machine Theory，2021，166：104493.

(下转第127页)

不足导致细节缺失的问题，本文从注意力网络和深度图的中间融合表示这两方面考虑以解决上述问题。首先，本文提出的轴向空间注意力机制有助于充分提取目标物体的局部结构信息；其次，二维图像能通过深度图这一中间表示推测出物体的可见表面细节信息，与三维平均形状结合，对于重建细节方面有较大的提升效果。消融实验结果表明单独使用轴向空间注意力机制或中间融合表示模块都是有效的，且两者可以联合应用来获得更优的效果，能够改善细节特征提取不足的问题。本文方法在公开的ShapeNet数据集上可以取得较好的重建效果，可以为自动驾驶、农业、规划设计、考古与文物保护、医疗等领域的应用提供参考。未来考虑将模型轻量化以及增强模型的迁移性，应用于具体领域如基于单幅图像的文物、人脸和复杂场景的三维重建。

参考文献：

[1] 陈　加，张玉麒，宋　鹏，等. 深度学习在基于单幅图像的物体三维重建中的应用[J]. 自动化学报，2019，45(4)：657-668.
Chen Jia，Zhang Yuqi，Song Peng，et al. Application of deep learning to 3D object reconstruction from a single image[J]. Acta Automatica Sinica，2019，45(4)：657-668.

[2] Fu K，Peng J，He Q，et al. Single image 3D object reconstruction based on deep learning：A review [J]. Multimedia Tools and Applications，2021，80(1)：463-498.

[3] Choy C B，Xu D，Gwak J Y，et al. 3dr2n2：A unified approach for single and multi-view 3d object reconstruction [C]// European Conf. on Computer Vision，2016：628-644.

[4] Yang B，Wang S，Markham A，et al. Robust attentional aggregation of deep feature sets for multi-view 3D reconstruction[J]. Inter. J. of Computer Vision，2020，128(1)：53-73.

[5] Mescheder L，Oechsle M，Niemeyer M，et al. Occupancy networks：Learning 3d reconstruction in function space[C]// Proc. of the IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition，2019：4460-4470.

[6] Xie H，Yao H，Sun X，et al. Pix2vox：Context-aware 3d reconstruction from single and multi-view images[C]// Proc. of the IEEE/CVF Inter. Conf. on Computer Vision，2019：2690-2698.

[7] Xie H，Yao H，Zhang S，et al. Pix2Vox＋＋：multi-scale context-aware 3D object reconstruction from single and multiple images[J]. Inter. J. of Computer Vision，2020，128(12)：2919-2935.

[8] Graham B，Engelcke M，Van Der Maaten L. 3d semantic segmentation with submanifold sparse convolutional networks [C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition，2018：9224-9232.

[9] He K，Zhang X，Ren S，et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition，2016：770-778.

[10] Wu J，Wang Y，Xue T，et al. Marrnet：3d shape reconstruction via 2.5d sketches [J]. Adv. in Neural Information Processing Systems，2017，30：540-550.

[11] Rahman M A，Wang Y. Optimizing intersection-over-union indeep neural networks for image segmentation[C]// Inter. Symp. on Visual Computing，2016：234-244.

[12] Lorensen W E，Cline H E. Marching cubes：A high resolution 3D surface construction algorithm [J]. ACM Siggraph Computer Graphics，1987，21(4)：163-169.

作者简介：

周　敏(1998—)，女，四川省内江市人，硕士研究生，主要研究方向为深度学习、图像处理；

张俊然(1978—)，男，湖南省常德市人，教授，博士研究生导师，CCF会员(09692M)，主要研究方向包括医学影像与大数据分析、类脑人工智能与模式识别。

(上接第108页)

[12] 玄光男，程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
Xuan Guangnan，Cheng Runwei. Genetic Algorithms and Engineering Optimization[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2004.

[13] 林贻翔. 无线激光通信光电跟瞄技术研究[D]. 武汉：武汉大学，2017.
Lin Yixiang. Research of electro-optical tracking system for wireless laser communication[D]. Wuhan：Wuhan University，2017.

作者简介：

林贻翔(1989—)，男，福建省福清市人，博士，高级工程师，分别于2012年、2017年获得武汉大学理学学士、工学博士学位，主要从事无线激光通信、光束控制方面的研究工作；

吴世奇(1983—)，男，四川省乐山市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为宽带无线通信系统传输组网技术、激光/射频混合通信技术、高速信号处理技术；承担国家级、省部级项目10多项，获省部级科技进步二等奖1项，获发明专利授权3件。