

基于动态虚拟相机的旋转棱镜扫描成像系统 运动模糊消除技术研究

李新东*, 李安虎#, 周正旻, 刘兴盛, 邓兆军

同济大学机械与能源工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月6日; 录用日期: 2023年5月22日; 发布日期: 2023年5月29日

摘要

旋转棱镜-相机成像系统在动态目标识别和跟踪等新兴领域展现了很好的应用前景。然而, 其性能受到运动模糊问题的限制。为了解决旋转棱镜-相机成像系统中的运动模糊问题, 本文基于运动成像分析方法, 建立了动态虚拟相机的运动模糊数学模型, 以表征系统的实时成像模糊机制。通过分析动态虚拟相机一阶运动表达式, 提出了动态虚拟相机成像的运动模糊核估计方法和运动模糊消除算法。基于所提出的方法, 可以获得扫描图像的运动模糊核, 然后结合维纳滤波来消除模糊。实验结果表明, 所提出的运动模糊消除算法能有效地消除运动模糊, 提高实时扫描成像系统的成像质量。

关键词

运动模糊消除, 旋转棱镜, 动态虚拟相机

Motion Deblurring Technology Research for Risley Prism Scanning Imaging System Based on Dynamic Virtual Camera

Xindong Li*, Anhu Li#, Zhengyang Zhou, Xingsheng Liu, Zhaojun Deng

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Apr. 6th, 2023; accepted: May 22nd, 2023; published: May 29th, 2023

Abstract

The Rotating Prism-Camera Imaging System (RPCIS) demonstrates promising application pros-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李新东, 李安虎, 周正旻, 刘兴盛, 邓兆军. 基于动态虚拟相机的旋转棱镜扫描成像系统运动模糊消除技术研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2740-2751. DOI: 10.12677/mos.2023.123251

pects in the emerging field of dynamic target tracking and recognition. However, its performance is limited by motion blur issues. To solve the motion blur problem in the rotating prism-camera imaging system, developed by motion imaging analysis methods, a motion blurring mathematical model of the dynamic virtual camera (DVC) is established to characterize the real-time imaging blurring mechanism. By analyzing the kinematics of DVC based on first-order motion expression of rotating double-prism scanners, a motion blur kernel estimation method and the algorithm for motion deblurring are proposed. Based on the proposed method, the motion blur kernel of the scanning image can be obtained, and then the wiener filtering is combined to eliminate the blur. Experimental results demonstrate that the proposed motion deblurring method effectively eliminates motion blur and improves the image quality of the real-time scanning imaging system.

Keywords

Motion Deblurring, Risley Prism, Dynamic Virtual Camera

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了满足各种搜索和跟踪需求, 研究人员提出并发展了各种成像系统来实现搜索和跟踪成像[1]。这些设备通常使用面阵相机或线扫描相机, 并采用基于镜面反射的扫描成像或基于棱镜折射的扫描成像两种扫描方式[2] [3]。这些系统旨在实现全景扫描成像, 并在搜索后跟踪目标[4]-[10]。

旋转棱镜扫描仪因其紧凑结构、低转动惯量和良好的指向性能, 已被广泛应用于激光通信、激光雷达和光束扫描等领域[11] [12] [13] [14] [15]。通过在相机前安装旋转棱镜, 可以精确地改变相机的视轴指向。Lavigne 等人利用旋转棱镜构建了一套步进 - 凝视成像系统, 实现了高分辨率和大视场成像[16]。基于类似原理, 旋转棱镜被用于图像拼接、超分辨率、多视角成像、三维重建和目标跟踪[14]-[24]。

对于旋转棱镜扫描仪, 先前的研究主要关注动态扫描模式和光束畸变。Marshall 等人系统地研究了旋转棱镜扫描模式, 分析了不同旋转速度、不同棱镜倾角下的光束扫描图案[25]。Jeno 等人探讨了具有任意数量棱镜的棱镜组的扫描轨迹[26]。Schwarze 等人发现了棱镜光束压缩效应, 提出光束压缩系数与出射光和出射面法向量夹角的余弦值成反比[27]。Lavigne 等人指出旋转棱镜的成像畸变与棱镜形状相似, 发现图像畸变的大小可以近似为线性变形[28]。Huang 等人提出了一种误差源检测方法, 用迭代算法消除图像矫正误差[29]。之前的这些研究主要集中在静态成像上, 很少涉及动态成像, 在扫描成像过程中, 棱镜是旋转的, 这种模式可以看作是相机在动态连续地扫描场景, 所以需要考虑运动补偿[30] [31]。

在扫描成像应用中, 相机曝光时间内被成像物体与相机成像平面之间存在相对运动, 这会导致运动模糊和图像退化。因此, 研究运动模糊消除技术对解决这个问题至关重要。为此, 我们基于旋转棱镜相机成像系统提出了动态虚拟相机成像模型, 并基于动态虚拟相机模型进行运动学分析, 提出了一种扫描图像运动模糊消除算法, 提高了系统成像清晰度。

2. 基于动态虚拟相机模型的运动分析

如图 1 所示, 旋转双棱镜 - 相机成像系统由一个相机以及一对共轴但是独立旋转的旋转棱镜组成, 且相机的光心一般布置在光轴上。通过两个棱镜的独立旋转, 相机的视轴可以被调整到一个特定的区域

从而改变相机的成像视场，视轴调整后的具体指向取决于两个棱镜的转角。基于这个原理我们提出了一个等效的虚拟相机模型，这个模型可以生动地描述旋转棱镜 - 相机成像系统的成像特性，如图 1 所示，旋转棱镜 - 相机成像系统在特定棱镜角度组合下拍摄的任何图像都可以被视为虚拟相机拍摄的图像。在本节中，我们将进一步探讨虚拟相机的位姿计算方法并对虚拟相机进行运动学分析。

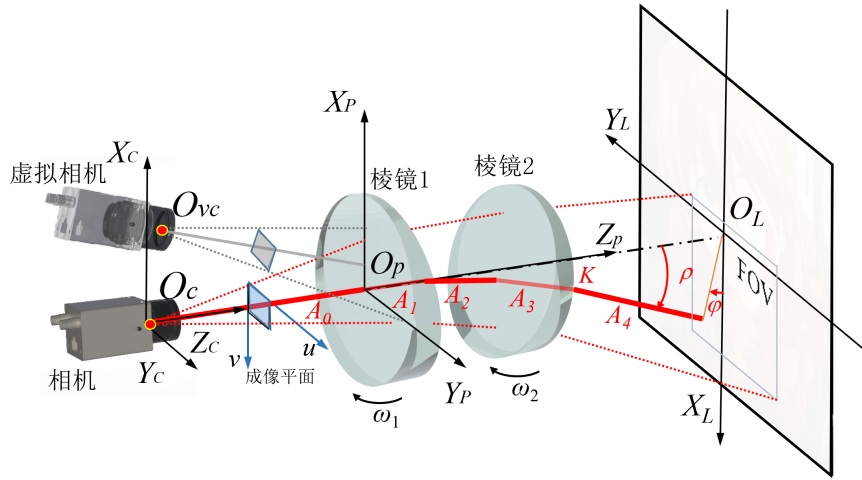


Figure 1. Schematic diagram of the model of the dynamic virtual camera
图 1. 动态虚拟相机模型示意图

2.1. 虚拟相机位姿计算

在图 1 中， A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别定义为实际相机的视轴方向向量、棱镜 1 入射面的折射光向量、棱镜 1 的出射光向量、棱镜 2 入射面的折射光向量、棱镜 2 的出射光向量。根据折射定律[12]，折射光束可以表示为：

$$A_{out} = \frac{n_1}{n_2} A_m + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 [1 - (A_m \cdot N_i)^2]} - \frac{n_1}{n_2} (A_m \cdot N_i) \right) \cdot N_i \quad (1)$$

其中 A_{in} 和 A_{out} 分别是入射光束和折射光束的单位方向向量； N_i 是棱镜工作面的单位法向量； n_1 和 n_2 分别是入射介质和折射介质的折射率。对于空气，其折射率为 1，旋转棱镜的折射率为 n 。

在图 1 中，沿 Z_c 正轴的四平面的单位法向量依次表示为 $N_1 \sim N_4$ ：

$$N_1 = [x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}]^T = [0, 0, 1]^T \quad (2a)$$

$$N_2 = [x_{N2}, y_{N2}, z_{N2}]^T = [\cos(\theta_1)\sin(\alpha), \sin(\theta_1)\sin(\alpha), \cos(\alpha)]^T \quad (2b)$$

$$N_3 = [x_{N3}, y_{N3}, z_{N3}]^T = [-\cos(\theta_2)\sin(\alpha), -\sin(\theta_2)\sin(\alpha), \cos(\alpha)]^T \quad (2c)$$

$$N_4 = [x_{N4}, y_{N4}, z_{N4}]^T = [0, 0, 1]^T \quad (2d)$$

根据公式(1)和公式(2)，可以得到出射光束矢量 A_4 的表达式。

如图 1 所示，定义俯仰角 ρ 为出射光束 A_4 与 Z_p 轴的正方向之间的夹角；方位角 ϕ 是出射光束在 $X_L O_L Y_L$ 平面的投影与 X_L 轴的正方向之间的夹角，假设 $A_4 = [x_{a4}, y_{a4}, z_{a4}]^T$ ，则有：

$$\rho = \arccos(z_{a4}) \quad (3a)$$

$$\varphi = \begin{cases} \arccos\left(\frac{x_{a4}}{\sqrt{x_{a4}^2 + y_{a4}^2}}\right) & y_{a4} \geq 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{x_{a4}}{\sqrt{x_{a4}^2 + y_{a4}^2}}\right) & y_{a4} < 0 \end{cases} \quad (3b)$$

假设实际相机成像平面上两个像素点在图像坐标系中位置为 (x_{s1}, y_{s1}) 和 (x_{s2}, y_{s2}) ， f 是相机的焦距，则这两个像素点在相机坐标系中的坐标分别为 (x_{s1}, y_{s1}, f) 和 (x_{s2}, y_{s2}, f) 。由于相机光学中心作为相机坐标系的原点，我们可以得到两个入射光矢量 $[x_{s1}, y_{s1}, f]^T$ 和 $[x_{s2}, y_{s2}, f]^T$ 。通过公式(1)~公式(3)，我们可以计算得到图 2 中 S_1 、 S_2 、 K_1 、 K_2 。如图 2 所示，我们可以通过计算两个成像光束 $S_1 = [a_1, b_1, c_1]^T$ ， $S_2 = [a_2, b_2, c_2]^T$ 的交点得到虚拟相机的光学中心位置，定义为 $O_{vc} (x_{vc}, y_{vc}, z_{vc})$ ，两个成像光束 S_1 、 S_2 分别通过棱镜 2 表面 Σ_4 上的出射点 $K_1(x_1, y_1, z_1)$ ， $K_2(x_2, y_2, z_2)$ 。

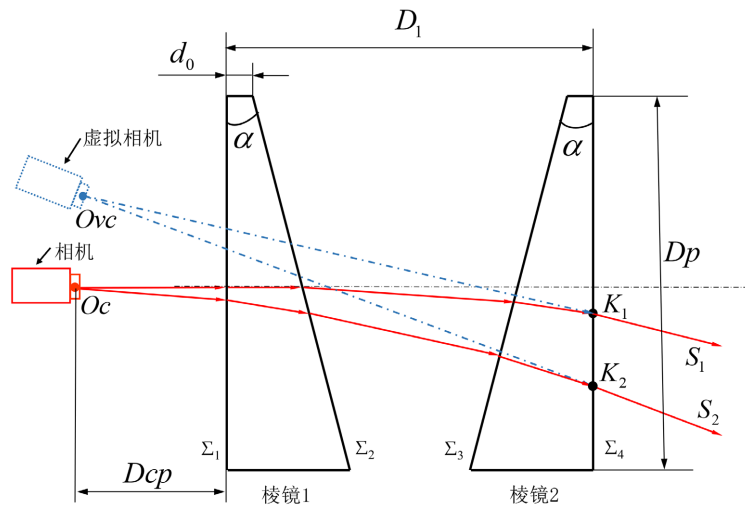


Figure 2. Schematic diagram of dynamic virtual camera pose computation
图 2. 动态虚拟相机位姿计算原理图

通过计算以下公式得到动态虚拟相机的光学中心位置在实际相机坐标系中的位置：

$$\begin{cases} \frac{x_{vc} - x_1}{a_1} = \frac{y_{vc} - y_1}{b_1} = \frac{z_{vc} - z_1}{c_1} \\ \frac{x_{vc} - x_2}{a_2} = \frac{y_{vc} - y_2}{b_2} = \frac{z_{vc} - z_2}{c_2} \end{cases} \quad (4)$$

基于公式(4)可以获得虚拟相机的光心 O_{vc} 与实际相机光心之间的平移矩阵 $T_{vc} = [x_{vc}, y_{vc}, z_{vc}]^T$ 。

虚拟相机与实际相机的相对旋转矩阵 R_{vc} 为实际相机视轴到出射光束之间的旋转矩阵，可以根据 Rodrigues 公式[32]求取。

虚拟相机在实际相机坐标系中的位姿可以表示为：

$$DVC_{RT} = \begin{bmatrix} R_{vc} & T_{vc} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

基于公式(5)，空间中任意一点在世界坐标系中的坐标与在虚拟相机像素坐标系的坐标之间的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} u_v \\ v_v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_{vc}} \begin{bmatrix} f & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{vc} & T_{vc} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{wc} & T_{wc} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 f 是相机的焦距, γ 是 x 和 y 像素轴之间的倾斜系数, R_{wc} 和 T_{wc} 分别是实际相机坐标系和世界坐标系之间的相对旋转矩阵和平移矩阵, 实际相机的内部参数和外部参数可以通过张正友标定法得到。

2.2. 动态虚拟相机运动学分析

虽然虚拟相机的运动与棱镜的旋转之间的关系是非线性的, 但虚拟相机的光学中心总是在相机视轴出射光束 A_4 的反向延长线上, 所以首先我们需要将棱镜的旋转速度映射到相机视轴出射光束 A_4 的运动速度上。为了减少计算的复杂性, 将采用一阶近似算法[33]: 该算法将棱镜看作是一个具有小顶角的光楔, 其对光束的偏转角的大小只取决于棱镜的楔角和折射率, 出射的光束指向棱镜主截面的厚端。如图 3 所示, 光束在(O)处进入双棱镜系统并从棱镜 1 处射出。随着棱镜的旋转, 偏转矢量 δ_1 的末端沿着半径为 δ_1 的圆 π_1 移动。然后光束入射到棱镜 2 上, 偏转矢量 δ_2 的末端将沿着半径为 δ_2 的圆运动。最后总的偏转矢量 δ 可以被认为是 δ_1 和 δ_2 的矢量和。

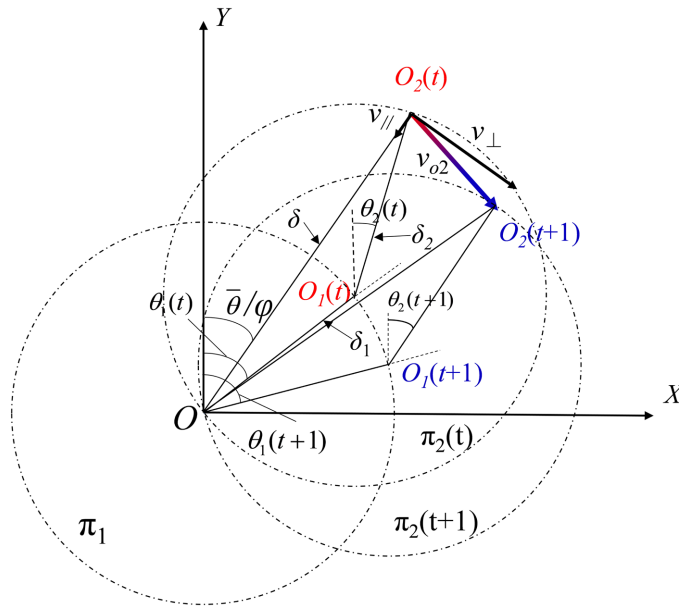


Figure 3. The kinematics analysis of the dynamic virtual camera based on a first-order centering algorithm
图 3. 基于一阶近似算法的动态虚拟相机运动学分析

当两个棱镜的参数相同时, 我们可以得到成像光轴方位角的一阶近似值, 它相当于图 4 中棱镜扫描仪的等效主截面的旋转角度, 其旋转角的表达式为:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \quad (7a)$$

棱镜之间的旋转角度差为:

$$\hat{\theta} = \theta_2 - \theta_1 \quad (7b)$$

在一阶近似算法中, $\bar{\theta}$ 和 φ 之间的关系为:

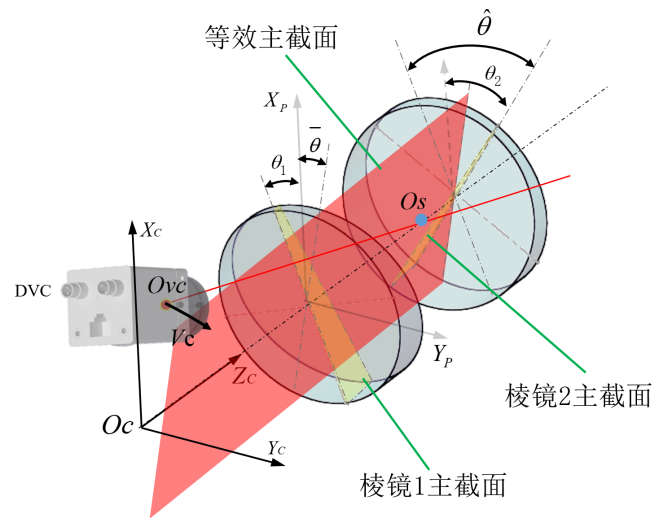


Figure 4. Schematic diagram of dynamic virtual camera equivalent main section
图 4. 动态虚拟相机等效主截面的示意图

$$\bar{\theta} = \varphi \quad (7c)$$

对于旋转双棱镜扫描成像系统，出射光束的偏转角为：

$$|\delta|^2 = |\delta_1|^2 + |\delta_2|^2 - 2 \cdot |\delta_1| |\delta_2| \cdot \cos(\pi - \hat{\theta}), \quad |\delta| > 0 \quad (8a)$$

两个棱镜的参数是相同的，因此它们具有相同的偏转角，所以：

$$\delta_1 = \delta_2 = n\alpha \quad (8b)$$

可以得到：

$$|\delta| = \sqrt{2}n\alpha \left(1 + \cos(\hat{\theta})\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8c)$$

O_2 的速度 v_{o2} 可以分为沿 δ 的径向速度 v_{\perp} 和沿 δ 方向的法向速度 $v_{//}$ ：

$$v_{\perp} = \frac{d\bar{\theta}}{dt} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \quad (9a)$$

$$v_{//} = \frac{d\delta}{dt} = \sqrt{2}n\alpha(\omega_2 - \omega_1) \sin(\hat{\theta}) \left(1 + \cos(\hat{\theta})\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9b)$$

O_2 的速度为：

$$v_{o2} = v_{\perp} + v_{//} \quad (10a)$$

v_{o2} 的方向为：

$$\begin{cases} \beta = \bar{\theta} + \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{v_{//}}{v_{\perp}}\right), & v_{\perp} \geq 0 \\ \beta = \bar{\theta} - \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{v_{//}}{v_{\perp}}\right), & v_{\perp} < 0 \end{cases} \quad (10b)$$

因此，基于一阶运动表达式，我们可以得到视轴指向方位角和俯仰角的变化方程，它同时也描述了动态虚拟相机所在光束的空间运动变化状态。

3. 运动模糊核估计方法及运动模糊消除算法

3.1. 运动模糊核估计

在扫描成像过程中动态虚拟相机与被成像物体之间产生相对运动，引入运动模糊并导致图像退化，运动模糊的图像退化表达方式为：

$$g(u, v) = f(u, v) * h(u, v) + n(u, v) \tag{11a}$$

其中 $h(u, v)$ 是运动模糊函数， $*$ 表示卷积操作 $f(u, v)$ 为原始图像， $n(u, v)$ 是噪声函数[34] [35]，运动模糊函数的一般形式如下：

$$h(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{L_b} & \text{if } \sqrt{u^2 + v^2} \leq \frac{L}{2} \text{ and } \frac{u}{v} = -\tan(\theta_b) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11b}$$

在图 5 中，为了计算动态虚拟相机从 t 到 $t + T$ 的运动距离，首先我们需要计算动态虚拟相机的运动速度。一般来说，相机的曝光时间很短，那么动态虚拟相机运动距离 S 可以近似为图 5 中的 $S = V_c T$ ， V_c 是动态虚拟相机的运动速度。

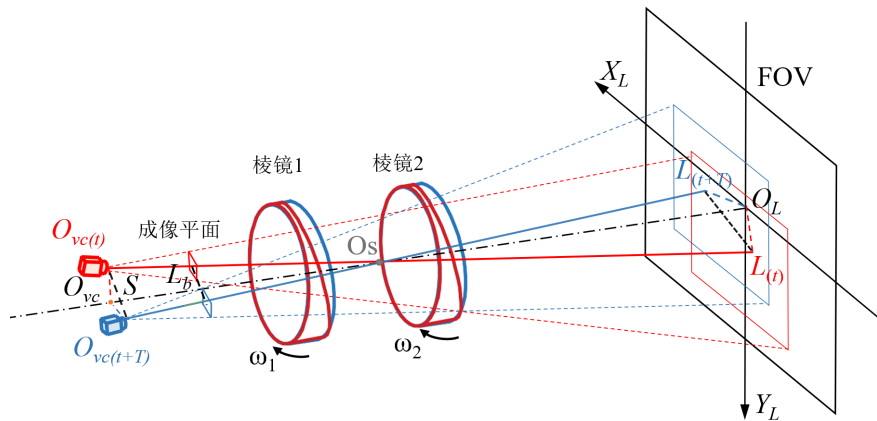


Figure 5. Schematic diagram of scanning imaging degradation
图 5. 扫描成像图像退化的示意图

为了计算动态虚拟相机的运动速度，首先我们需要计算图 5 中所示的点 O_s 的位置， O_s 是出射光束和 Z_c 轴的交点。根据公式(1)、公式(2)和公式(3)，我们可以得到不同棱镜旋转角度下的出射光束 $S_n(x_n, y_n, z_n)$ 和相应的出射点 $K_k(x_k, y_k, z_k)$ ，然后我们可以通过计算 z_{os} 得到 O_s 的确切位置：

$$\begin{cases} z_{os} = \frac{z_n}{y_n} \times (-y_k) + z_k \\ z_{os} = \frac{z_n}{x_n} \times (-x_k) + z_k \end{cases} \tag{12}$$

图 6 显示， O_s 点在 Z_c 轴上的波动 $< 0.2\%$ ，我们可以把 O_s 视为旋转不动点， V_c 和 v_{o2} 之间存在线性关系，可以表示为：

$$\begin{cases} V_{c\perp} = v_{\perp} \sqrt{x_{o_{vc(t)}}^2 + y_{o_{vc(t)}}^2} \\ V_{c//} = v_{//} |O_{vc(t)} O_s| \end{cases} \tag{13a}$$

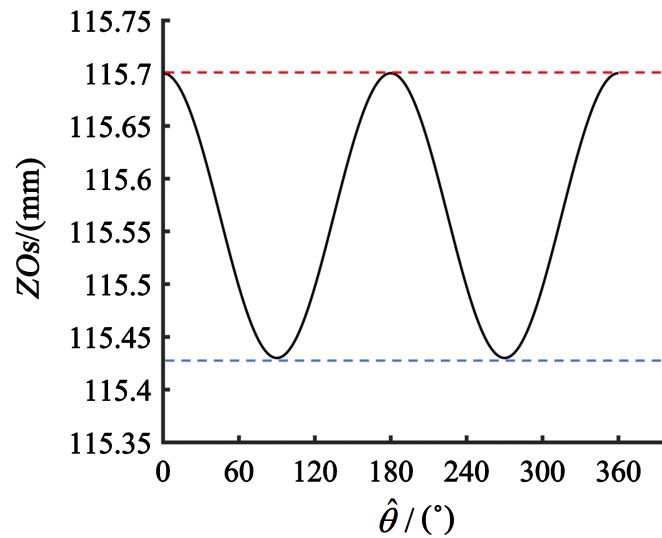


Figure 6. Fluctuation value of point O_s on the Z_c -axis
图 6. Z_c 轴上 O_s 点的波动值

然后:

$$V_c = V_{c//} + V_{c\perp} \quad (13b)$$

其中 $V_{c\perp}$ 和 $V_{c//}$ 是 V_c 在动态虚拟相机像素坐标中沿 u 轴和 v 轴的分量。

如图 5 所示, 基于相似三角形原理, $\Delta O_{vc(t)} O_s O_{vc(t+T)} \cong \Delta L_{(t)} O_s L_{(t+T)}$, $\Delta O_{vc(t)} O_s O_{vc} \cong \Delta L_{(t)} O_s O_L$, 可以得到:

$$\frac{O_{vc(t)} O_{vc(t+T)}}{O_s O_{vc(t)}} = \frac{L_{(t)} L_{(t+T)}}{O_s L_{(t)}} \quad (14a)$$

根据公式(6)、公式(9)、公式(13)和公式(14), 我们可以计算出动态虚拟相机像素坐标中 u 轴和 v 轴的模糊长度:

$$\Delta u = \frac{z_{os} - z_{ovc} - f}{z_{os} - z_{ovc}} V_{c\perp} T \quad (14b)$$

$$\Delta v = \frac{z_{os} - z_{ovc} - f}{z_{os} - z_{ovc}} V_{c//} T \quad (14c)$$

然后, 像素坐标系中的运动模糊长度 L_b , 以及运动模糊角度 θ_b 可以按如下方式计算:

$$L_b = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2} \quad (14d)$$

$$\theta_b = \arctan\left(\frac{\Delta u}{\Delta v}\right) \quad (14e)$$

上述表达式表明, 运动模糊的长度和方向仅与系统参数、棱镜角度、焦距和动态虚拟相机的光学中心的空间位置 O_{vc} 有关。

3.2. 运动模糊消除算法实现

在获得给定图像的运动模糊核的参数后, 可以采用维纳滤波法进行运动去模糊处理[36]。维纳滤波是一种用于图像去模糊的线性滤波方法, 假设扫描图像为 $g(u, v)$, 原始图像为 $f(u, v)$, 运动模糊核为 $h(u, v)$,

以及噪声 $n(u, v)$ 。在频域中图像模糊过程可以表示为:

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v) \quad (15a)$$

其中, $G(u, v)$, $F(u, v)$, $H(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别是 $g(u, v)$, $f(u, v)$, $h(u, v)$ 和加性噪声 $n(u, v)$ 的傅里叶变换。

维纳滤波器的频域表达式为:

$$W(u, v) = H^*(u, v) / (|H(u, v)|^2 + K) \quad (15b)$$

其中, $W(u, v)$ 代表维纳滤波器, $H^*(u, v)$ 是复数共轭, $|H(u, v)|^2$ 是 $H(u, v)$ 的平方, K 是一个可调参数, 用于平衡去模糊化和噪声抑制:

$$K = |N(u, v)|^2 / |F(u, v)|^2 \quad (15c)$$

根据维纳滤波, 复原图像 $F'(u, v)$ 可以用以下表达式计算:

$$F'(u, v) = W(u, v) * G(u, v) \quad (15d)$$

然后, 通过对 $F'(u, v)$ 进行傅里叶逆变换, 得到复原图像 $f'(u, v)$:

$$f'(u, v) = IFFT(F'(u, v)) \quad (15e)$$

基于动态虚拟相机的一阶运动表达式和扫描模糊数学模型, 提出了一种实时扫描图像模糊消除算法, 如图 7 所示。

Algorithm 1: Scanning imaging restoration algorithm

Input: I_b : scanning image, $R[T, f]$: Camera, $R[\theta_1, \theta_2, \omega_1, \omega_2]$: Risley prism controller

Output: I_r : motion deblurring image

calibrate the camera via zhang's camera calibration ;

initialization $Psf[L_b, \theta_b]$;

v_{\perp} radial velocity along the equivalent main section;

$v_{//}$ perpendicular speed of the equivalent main section;

Read Risley prism controller feedback $C[\theta_1, \theta_2, \omega_1, \omega_2]$;

if $((\omega_1 \neq 0) \wedge (\omega_2 \neq 0))$ **then**

$v_{\perp} \leftarrow \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$;

$v_{//} \leftarrow \sqrt{2n\alpha(\omega_2 - \omega_1)\sin(\hat{\theta})^{\frac{1}{2}}}$;

$V_{c\perp} \leftarrow v_{\perp} \sqrt{x_{O_{vc}(t)}^2 + y_{O_{vc}(t)}^2}$;

$V_{c//} \leftarrow v_{//} |O_{vc}(t)O_s|$;

$\Delta u \leftarrow \frac{z_{os} - z_{ovc} - f}{z_{os} - z_{ovc}} V_{c\perp} T$;

$\Delta v \leftarrow \frac{z_{os} - z_{ovc} - f}{z_{os} - z_{ovc}} V_{c//} T$;

$L_b \leftarrow \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}$;

$\theta_b \leftarrow \arctan(\frac{\Delta u}{\Delta v})$;

 compute $Psf(L_b, \theta_b)$, $\theta_b \in (0, 360^\circ)$;

$I_r \leftarrow IFFT \{ [(H^*(u, v) / |H(u, v)|^2 + K)] * G(u, v) \}$;

else

$I_r \leftarrow I_b$;

end

return I_r ;

Figure 7. The algorithm of the scanning image deblurring

图 7. 扫描图像运动模糊消除算法

4. 实验

实验设备参数如表 1 所示。

Table 1. The parameter of the prism and camera

表 1. 相机棱镜和棱镜的参数

相机		棱镜	稿件
视场角	$13.6^\circ \times 11.3^\circ$	d_0	10 mm
焦距	25 mm	Dp	80 mm
分辨率	1600 (W) \times 1200 (H)	n	1.517
曝光时间	20~5,000,000 μ s	α	10°
曝光模式	全局快门	D_1	100 mm
像元尺寸	$4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$	D_{cp}	50 mm

实验中使用的相机焦距为 25 mm，相机曝光时间设定为 20 ms，通过系统控制器可以获取棱镜 1 的旋转速度 $\omega_1(t)$ ，棱镜 2 的旋转速度 $\omega_2(t)$ ，以及棱镜的实时旋转位置 $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 。图 8(a) 和图 8(c) 是在扫描成像过程中选择的两帧图像。图 8(a) 所对应的棱镜旋转角度为 $\theta_1 = 30^\circ$ ， $\theta_2 = 30^\circ$ ，棱镜的旋转速度为 $\omega_1 = 30^\circ/\text{s}$ ， $\omega_2 = 30^\circ/\text{s}$ 。图 8(c) 所对应的棱镜旋转角度为 $\theta_1 = 320^\circ$ ， $\theta_2 = 340^\circ$ ，棱镜的旋转速度为 $\omega_1 = 40^\circ/\text{s}$ ， $\omega_2 = 20^\circ/\text{s}$ 。图 8(b) 和图 8(d) 分别是图 8(a) 和图 8(c) 的运动模糊消除图像。基于所提出的算法，在配置 matlab2020a 和 i7-9750h@4.0 Ghz 处理器的计算机上可以在 0.0986 s 内完成分辨率为 1600×1200 的图像的运动模糊消除。

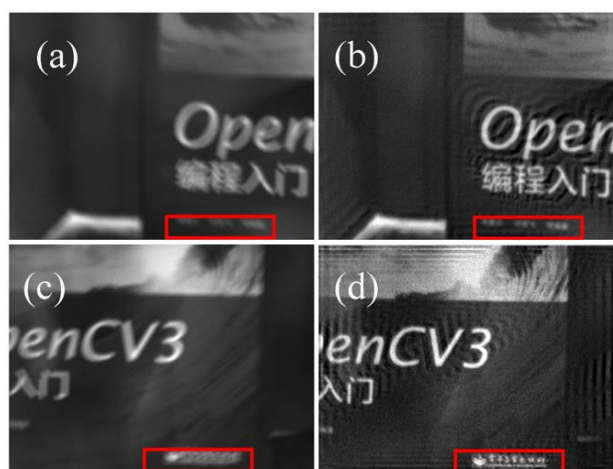


Figure 8. Scanning image motion deblurring. 1st group: (a) The blurred image, (b) is the motion deblurring image of (a); 2nd group: (c) The blurred image, (d) is the motion deblurring image of (c)
图 8. 扫描图像运动模糊消除。第 1 组: (a) 模糊图像, (b) 为(a)的运动模糊消除图像; 第 2 组: (c) 模糊的图像, (d) 为(c)的运动模糊消除图像

运动去模糊方法的效果可以用清晰度评价指标函数来评价，设定模糊图像图 8(b) 和图 8(d) 为是清晰图像，其相对清晰度为 100%。表 2 显示了模糊图像的相对清晰度，实验表明，该方法可以有效地提高旋转棱镜 - 相机成像系统扫描成像的图像清晰度。

Table 2. The relative clarity of blurred image
表 2. 模糊图像的相对清晰度

Group	TenenGrad	Brenner	Variance	Square Grad	Vollath	Window Grad	Entropy
1	62.20%	60.03%	86.63%	65.34%	87.33%	58.77%	91.64%
2	34.81%	38.75%	85.41%	35.53%	83.49%	28.14%	92.27%

5. 结论

本文提出了一种旋转棱镜-相机成像系统扫描图像的运动模糊核估计方法和运动模糊消除算法。通过建立动态虚拟相机模型，我们提出了一种基于动态虚拟相机的运动模糊核估计方法：该方法基于一阶近似算法对动态虚拟相机进行运动学分析，得到动态虚拟相机的一阶运动表达式，结合旋转棱镜-相机成像系统的参数来建立运动模糊核的数学模型，基于该模型可以获得图像的运动模糊核，最后使用维纳滤波实现了运动模糊消除。实验结果表明，所提出的运动模糊消除算法能有效地消除运动模糊，提高实时扫描成像系统的成像质量。同时本文也验证了一阶近似算法对于旋转棱镜扫描成像分析的有效性，为动态目标跟踪和实时环境扫描提供了有效的解决方案。

基金项目

国家自然科学基金面上项目“动态虚拟相机变视轴立体成像原理与方法”（编号 61975152）。

参考文献

- [1] Xu, Z., Wang, J., Zhao, L., Wang, P. and Fang, J. (2011) An All-Reflective Optical System for the Modulation Transfer Function Measurement of Near-Infrared Focal Plane Arrays. *Chinese Journal of Lasers*, **38**, s116002.
- [2] Sandau, R. and Eckardt, A. (1995) The Stereo Camera Family WAOSS/WAAC for Spaceborne/Airborne Applications. *XVIII Congress of ISPRS*, Vienna, 9-14 July 1996, 170-175.
- [3] Paparoditis, N., Souchon, J.-P., Martinot, G. and Pierrot-Deseilligny, M. (2006) High-End Aerial Digital Cameras and Their Impact on the Automation and Quality of the Production Workflow. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **60**, 400-412. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.06.003>
- [4] Zhou, Y., Chen, Y., Sun, L., et al. (2020) Analysis on Key Issues of Boresight Adjustment in Imaging Tracking Based on Risley Prisms. *Optical Engineering*, **59**, Article ID: 123104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.12.123104>
- [5] Wen, P. (2022) Multivariable Decoupling and Nonlinear Correction Method for Image-Based Closed-Loop Tracking of the Risley Prisms System. *Micromachines*, **13**, Article No. 2096. <https://doi.org/10.3390/mi13122096>
- [6] Li, A., Li, Q., Deng, Z., et al. (2020) Risley-Prism-Based Visual Tracing Method for Robot Guidance. *Journal of the Optical Society of America A*, **37**, 705-713. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.381445>
- [7] Petrie, G. and Walker, A. (2010) Airborne Digital Imaging Technology: A New Overview. *The Photogrammetric Record*, **22**, 203-225. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2007.00446.x>
- [8] Albertz, J., Ebner, H. and Neukum, G. (1996) The HRSC/WAOSS Camera Experiment on the Mars 96 Mission—A Photogrammetric and Cartographic View of the Project. *ISPRS Congress*, Vienna, 9-19 July 1996, 476-480.
- [9] Lan, Y., Thomson, S., Huang, Y., Hoffmann, W. and Zhang, H. (2010) Current Status and Future Directions of Precision Aerial Application for Site-Specific Crop Management in the USA. *Computers & Electronics in Agriculture*, **74**, 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.001>
- [10] Bostater, C., Jones, J., Frystacky, H., Coppin, G. and Neyt, X. (2011) Airborne Imaging Sensors for Environmental Monitoring and Surveillance in Support of Oil Spills and Recovery Efforts. *Proceedings SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, Vol. 8175, 81750B. <https://doi.org/10.1117/12.901231>
- [11] Rosell, F. (1960) Prism Scanner. *Journal of the Optical Society of America*, **50**, 521-526. <https://doi.org/10.1364/JOSA.50.000521>
- [12] Li, A., Sun, W., Yi, W. and Zuo, Q. (2016) Investigation of Beam Steering Performances in Rotation Risley-Prism Scanner. *Optics Express*, **24**, 12840-12850. <https://doi.org/10.1364/OE.24.012840>
- [13] Artamonov, S.I., Gryaznov, N.A., Kuprenyuk, V.I., Romanov, N.A. and Sosnov, E.N. (2016) Selection of Scanners for

- Use in Lidar Systems. *Journal of Optical Technology*, **83**, 549-555. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000549>
- [14] Wang, Z., Cao, J., Hao, Q., *et al.* (2019) Super-Resolution Imaging and Field of View Extension Using a Single Camera with Risley Prisms. *The Review of Scientific Instruments*, **90**, Article ID: 033701. <https://doi.org/10.1063/1.5050833>
- [15] Chen, Y., Wang, B., Li, Q., *et al.* (2022) Field-of-View-Enlarged Single-Camera 3D Shape Reconstruction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **71**, 1-12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3165271>
- [16] Han, Z. and Zhang, L. (2023) A Virtual Multi-Ocular 3D Reconstruction System Using a Galvanometer Scanner and a Camera. *Sensors*, **23**, Article No. 3499. <https://doi.org/10.3390/s23073499>
- [17] Zhang, H., Cao, J., Zhou, D., Cui, H., *et al.* (2022) Three-Dimensional Computational Ghost Imaging Using a Dynamic Virtual Projection Unit Generated by Risley Prisms. *Optics Express*, **30**, 39152-39161. <https://doi.org/10.1364/OE.472889>
- [18] Church, P., Matheson, J., Cao, X. and Roy, G. (2017) Evaluation of a Steerable 3D Laser Scanner Using a Double Risley Prism Pair. *Proceedings of the SPIE Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display*, Volume 10197, 101970O. <https://doi.org/10.1117/12.2262198>
- [19] Vuthea, V. and Toshiyoshi, H. (2018) A Design of Risley Scanner for LiDAR Applications. 2018 *International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, Lausanne, 29 July-2 August 2018, 1-2. <https://doi.org/10.1109/OMN.2018.8454641>
- [20] Lavigne, V. and Ricard, B. (2005) Step-Stare Image Gathering for High-Resolution Targeting. In: *Advanced Sensory Payloads for UAV*, RTO, Neuilly-sur-Seine, Paper 17.
- [21] Li, A., Liu, X., Gong, W., Sun, W. and Sun, J. (2019) Prelocation Image Stitching Method Based on Flexible and Precise Boresight Adjustment Using Risley Prisms. *JOSA A*, **36**, 305-311. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.36.000305>
- [22] Hao, Q., Wang, Z., Cao, J. and Zhang, F. (2018) A Hybrid Bionic Image Sensor Achieving FOV Extension and Foveated Imaging. *Sensors*, **18**, Article No. 1042. <https://doi.org/10.3390/s18041042>
- [23] Li, A. and Zhong, S. (2019) Calibration Method of Risley-Prism Imaging System. *Optics Communications*, **459**, Article ID: 124975. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124975>
- [24] Li, A., Liu, X. and Zhao, Z. (2020) Compact Three-Dimensional Computational Imaging Using Dynamic Virtual Camera. *Optics Letters*, **45**, 3801-3804. <https://doi.org/10.1364/OL.395983>
- [25] Marshall, G.F. (1999) Risley Prism Scan Patterns. *Proceedings of the SPIE*, **3787**, 74-86.
- [26] Jeon, Y.-G. (2011) Generalization of the First-Order Formula for Analysis of Scan Patterns of Risley Prisms. *Optical Engineering*, **50**, Article ID: 113002. <https://doi.org/10.1117/1.3655501>
- [27] Schwarze, C., Vaillancourt, R., Carlson, D., Schundler, E., Evans, T. and Engel, J.R. (2005) Risley-Prism Based Compact Laser Beam Steering for IRCM, Laser Communications, and Laser Radar. Optria Inc., Topsfield.
- [28] Lavigne, V. and Ricard, B. (2007) Fast Risley Prisms Camera Steering System: Calibration and Image Distortions Correction through the Use of a Three-Dimensional Refractive Model. *Optical Engineering*, **46**, Article ID: 043201. <https://doi.org/10.1117/1.2722754>
- [29] Huang, F., Ren, H., Shen, Y. and Wang, P. (2021) Error Analysis and Optimization for Risley-Prism Imaging Distortion Correction. *Applied Optics*, **60**, 2574-2582. <https://doi.org/10.1364/AO.418007>
- [30] Dainty, J.C. (1984) Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy. *Optica Acta: International Journal of Optics*, **32**, 1451-1452. <https://doi.org/10.1080/713821694>
- [31] Nemes, M.S., Jr., C.B. and Savoy, H. (2009) A Forward Motion Compensation System for Airborne Remote Sensing Platforms & Aerial Mapping Cameras. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, No. 2, 24-28.
- [32] Chen, S., Wang, G., Li, X., Zhang, Q., Shi, Z. and Guan, Y. (2020) Formalization of Camera Pose Estimation Algorithm Based on Rodrigues Formula. *Formal Aspects of Computing*, **32**, 417-437. <https://doi.org/10.1007/s00165-020-00520-5>
- [33] Boisset, G.C., Robertson, B. and Hinton, H.S. (2002) Design and Construction of an Active Alignment Demonstrator for a Free-Space Optical Interconnect. *IEEE Photonics Technology Letters*, **7**, 676-678. <https://doi.org/10.1109/68.388762>
- [34] Moghaddam, M.E. and Jamzad, M. (2007) Motion Blur Identification in Noisy Images Using Mathematical Models and Statistical Measures. *Pattern Recognition*, **40**, 1946-1957. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2006.11.022>
- [35] Al-Amri, S.S. and Kalyankar, N.V. (2010) A Comparative Study for Deblurred Average Blurred Images. *International Journal on Computer Science and Engineering*, **2**, 731-733.
- [36] Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2010) *Digital Image Processing*. 3rd Edition, Pearson Education, London, 374-376.