

花生传送带作业精准定位方法研究

Research on precise positioning method of conveyor belt for peanut

谷林峰^{1,2} 李 亚^{1,2} 丁彦玉^{1,2} 孙 科^{1,2}GU Lin-feng^{1,2} LI Ya^{1,2} DING Yan-yu^{1,2} SUN Ke^{1,2}

(1. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222;

2. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

(1. *Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry and Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin 300222, China;**2. Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)*

摘要:文章提出了一种面向花生类椭圆柱体目标,添加重心高度补偿的精准定位方法。该方法优化现场标定步骤,借助自制高精度标定块完成传送带平面标定,利用直接最小二乘法拟合花生椭圆轮廓曲线,重新校正短半轴图像信息,以传送带水平面为基准,映射到实际花生重心作出定位补偿。结果表明,该方法的平面定位精度优于1 mm,抓取成功率由87%提高至97%;现场测试表明该定位方法具有良好的工业实用性,能够满足实际生产需要。

关键词:花生;机器视觉;手眼标定;传送带

Abstract: A precise positioning method for peanut ellipsoid target with gravity center height compensation is proposed, which is suitable for field operation. This method optimizes the field calibration steps and completes the belt plane calibration with the help of self-made high-precision calibration block. The ellipse contour curve of peanut was fitted by the direct least square method, and the short half axis size was corrected again. The horizontal plane of the conveyor belt was taken as the reference, and the actual center of gravity of peanut was mapped to make positioning compensation. Grasping success rate increased from 87% to 97%. Field test shows that the positioning method has good industrial practicability which can meet the needs of actual production.

Keywords: peanut; machine vision; hand-eye calibration; conveyor belt

目前,花生批量分拣生产线主要依赖于人眼识别缺

陷,人工挑拣次品、分装成品,劳动成本大,误检率高,且抗疲劳能力差。近年来,机器视觉技术^[1-2]被逐渐应用于农作物流水生产线的自动分拣工作^[3-4],生产效率大幅提升。实践中,固有传送带生产线利用单目视觉引导机器人进行抓取的操作最为普遍,其核心问题是需要现场完成摄像机标定和手眼标定过程^[5]。多数基于传送带的标定方法^[6-7]都忽略了目标的重心高度信息,并不适用于花生等立体目标的定位分拣过程。利用场景特征^[8]和结构光平面^[9]等获取立体定位信息的手眼标定方法,但其三维信息的求解过程较复杂,难以在手眼无重合工作空间的现场环境下实施。

文章以挑选大批量花生的典型传送带生产线为对象,根据花生的分拣要求,拟提出一种能在现场简便操作的标定方法,并根据花生形态(图1)作出重心定位补偿。利用自制的高精度标定块,并使用与其过渡配合的标定针,引导机器人手臂末端插入指定标定孔,求取摄像机与机器人坐标系的位姿转换关系,避免传统方法以肉眼判别接触点的误差影响;针对不同大小的油炸花生分拣高度不一致的问题,建立关于花生图像轮廓与花生高度变化的关系模型^[10-11],以传送带为基准面对每颗花生进行高度补偿,避免单一平面标定对花生定位精度的影响,提高其对立体目标的定位抓取精度,旨在为基于传送带作业的目标三维定位提供一种求解思路和方法。

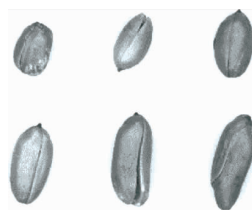


图1 花生形态

Figure 1 Peanut morphology

基金项目:天津市科技计划项目(编号:18ZXRHGX00020);天津市教委科研计划项目(编号:2018KJ118);天津市企业科技特派员项目(编号:19JCTPJC52100, 20YDTPJC00130, 20YDTPJC00140)

作者简介:谷林峰(1994—),男,天津科技大学在读硕士研究生。
E-mail: glf940104@163.com

收稿日期:2020-07-13

1 系统组成

现场标定系统(图 2)由工业级 CMOS 面阵相机、E6B2-C 增量式旋转编码器、低角度条形光源、传送带模块、TS6-600 四自由度 SCARA 机器人等组成,单目相机固定在上料端正上方,传送带输送待分拣花生到达机器人工作区域,进行分拣操作,部分系统根据产量要求,添加多台机器人对应一个视觉模块,协调运作。

2 标定原理

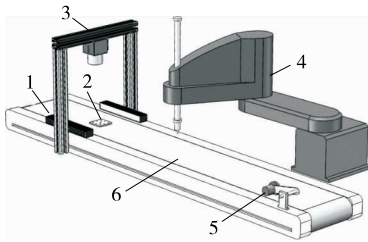
油炸花生流水线生产中,相机与机器人之间无重叠工作空间,固定单目相机与远端机器人的标定^[12]是通过标定块在传送带上移动前后的位置照片和编码器读数计算对应移动距离,工具坐标系末端多次触碰参考物指定点,求解出机器人与传送带的旋转平移关系,标定一旦完成,各部分位置关系将固定不变。

2.1 建立坐标系

为更好地描述各坐标系之间的相对位置关系,传送带坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 、相机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 与机器人坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 如图 3 所示。

2.2 成像几何关系

根据透视投影关系,从传送带坐标系转换至像素坐标系的过程属于三维坐标转二维坐标,根据 Zhang^[13] 提出的平面标定方法,计算摄像机内部参数。设传送带坐标系点 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 投影至像素坐标点 $p(\mu, \nu)$,暂不考虑 Z_w 高度信息,以矩阵形式表示:



1. 光源 2. 标定板 3. 相机 4. 机器人 5. 编码器 6. 传送带

图 2 现场标定系统

Figure 2 Field calibration system

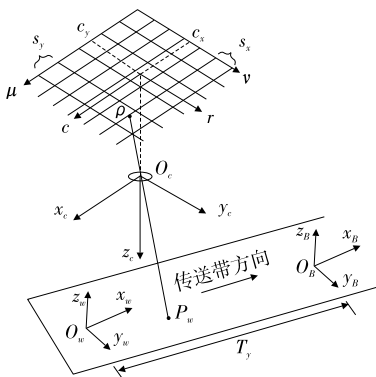


图 3 坐标系的建立

Figure 3 Coordinate system establishment

$$\alpha \begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_\mu & \beta & \mu_0 & 0 \\ 0 & f_\nu & \nu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

α ——比例因子;

f_μ, f_ν —— μ, ν 轴的比例因子;

β —— μ, ν 轴的倾斜程度;

(μ_0, ν_0) ——图像主点在像素坐标系下的坐标位置;

R, T ——旋转平移矩阵。

2.3 改进刚性变换矩阵

传送带坐标系与机器人坐标系之间的变化可看作刚性变换,空间位置点 P 相对于传送带坐标系的描述为 P_w ,转换成该点相对于机器人坐标系的描述 P_B 表述为:

$$P_B = R_W^B P_w + T_W^B, \quad (2)$$

式中:

T_W^B ——平移关系;

R_W^B ——旋转关系。

R_W^B 的各分量是该矢量在机器人基坐标系单位矢量方向的投影,可用单位矢量 $\hat{x}_w, \hat{y}_w, \hat{z}_w, \hat{x}_B, \hat{y}_B, \hat{z}_B$ 的点积表达为矩阵形式:

$$R_W^B = \begin{bmatrix} \hat{x}_w \cdot \hat{x}_B & \hat{y}_w \cdot \hat{x}_B & \hat{z}_w \cdot \hat{x}_B \\ \hat{x}_w \cdot \hat{y}_B & \hat{y}_w \cdot \hat{y}_B & \hat{z}_w \cdot \hat{y}_B \\ \hat{x}_w \cdot \hat{z}_B & \hat{y}_w \cdot \hat{z}_B & \hat{z}_w \cdot \hat{z}_B \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据旋转平移关系得:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & T_x \\ \sin\gamma & \cos\gamma & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = H_C^B \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:

γ ——两平面坐标系 X 轴之间的夹角;

T_x, T_y ——传送带坐标系相对于相机坐标系的 X、Y 方向平移量。

2.4 优化过程

为降低标定求解难度,在相机和机器人的安装过程中,利用机械结构特点,尽量保证安装位置水平,使机器人沿基坐标 Y 轴方向移动画线,方向与传送带运输方向平行,将所有相机与传送带、传送带与机器人的位姿转换关系整合,建立从像素坐标到机器人下的位置坐标的闭合转换关系 H_C^B 。

3 图像处理过程

因大小不同的花生重心高度不一致,且花生外形近似椭圆柱体,仅靠传送带水平面的二维平面位置信息不适用于花生的分拣过程,只有在平面标定后进行椭圆拟合算法提取花生轮廓,将花生重心高度补偿给机器人分拣位置,才能提高分拣精度。

3.1 图像预处理

为了更清晰地显示花生的轮廓信息,按照一定的变换关系,将采集到的花生图像转化为灰度图像,运用 Blob 分析法对图像进行二值化,图像分割得到前景和背景,连通域提取得到 ROI 区域(图 4)。

3.2 花生轮廓提取

为了后续图像处理中更准确地进行轮廓椭圆拟合,计算出花生的重心位置,首先需要获取花生的边缘轨迹。基于花生预处理后的二值化图像,在花生边缘的法线方向会呈现断层式的灰度变化,对二值化图像进行逐行逐列扫描,选取适合的阈值 σ ,记录扫描过程中前后灰度变化 Δ ,若 $\Delta > \sigma$,记录该像素点,否则舍弃,最终求得所有点的集为花生边缘轮廓(图 5)。

3.3 椭圆拟合

根据 Fitzgibbon 等^[14]提出的运用直接最小二乘法,对轮廓至少 6 个拟合点进行椭圆轮廓拟合,一般圆锥曲线表示为:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0. \quad (5)$$

假设提取的轮廓点为 (x_i, y_i) ,建立函数 $F(a, b, c, d, e, f)$ 为轮廓点与预期的椭圆曲线的代数距离,最小化代数距离函数,并添加约束条件 $4ac - b^2 = 1$,防止拟合轮廓为抛物线或双曲线,最终得椭圆轮廓(图 6)。

3.4 重心位置校正

由于镜头加工制造精度造成的径向位置误差对成像位置精度影响最大,为简化现场标定求解过程,将图像畸变充分近似为径向畸变^[15],提取椭圆轮廓圆心点像素坐

标 (μ, ν) 近似为花生重心位置,利用式(6)进行校正,设畸变校正后的坐标 $(\tilde{\mu}, \tilde{\nu})$ 为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mu} \\ \tilde{\nu} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + K(u^2 + v^2)} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:

K ——径向畸变量级(决定图像畸变程度)。

3.5 生成高度信息

取传送带平面的两点实际距离为 L ,采集图像平面上点 $p_1(\mu_1, \nu_1)$ 、 $p_2(\mu_2, \nu_2)$,即传送带平面的实际距离与图像像素距离之间存在映射因子 F_{ac} :

$$F_{ac} = \frac{L}{\sqrt{(\nu_1 - \nu_2)^2 + (\mu_1 - \mu_2)^2}}. \quad (7)$$

因花生呈长椭圆柱体,在传送带上运输时椭圆长半轴 R 近似平行于传送带平面,通过映射因子取像素坐标系中椭圆短半轴 r 计算花生实际轮廓宽度(见图 7)。以传送带平面为基准,可将花生重心高度补偿至机器人定位信息中。

4 标定过程及试验分析

为了提高平面标定精度,针对生产线手眼安装位置,设计适合于现场操作、简便易携的“9+2”高精度标定块,呈 3×3 矩阵排列的 9 孔为高精度孔,其余 2 孔为定位孔,并使用能与其过渡配合的标定针(图 8)。

4.1 相机与传送带标定

标定过程中,缓慢转动传送带使固定标定板依次在图 9 的视野前部 P_1 、中部 P_2 、后部 P_3 采集图像,提取 P_1 、 P_2 、 P_3 位置点坐标,记为 (μ_1, ν_1) 、 (μ_2, ν_2) 、 (μ_3, ν_3) 。

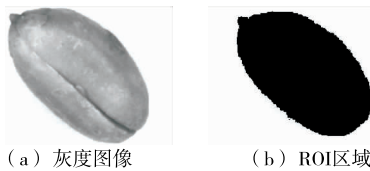


图 4 图像预处理
Figure 4 Image preprocessing

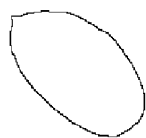


图 5 花生轮廓曲线
Figure 5 Peanut contour curve

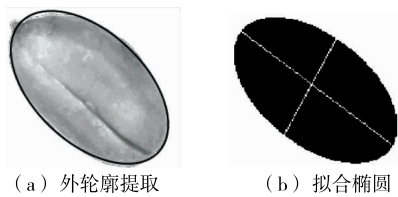


图 6 花生轮廓椭圆拟合
Figure 6 Ellipse fitting of peanut contour

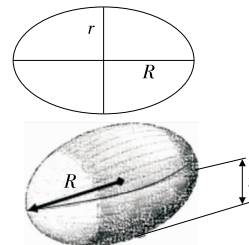


图 7 花生高度信息
Figure 7 Peanut height information

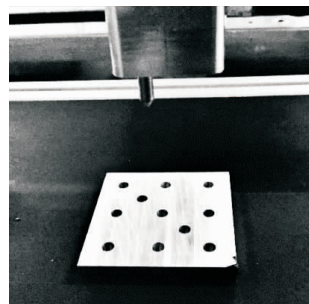


图 8 “9+2”标定块和标定针
Figure 8 “9+2” calibration block and needle

建立传送带坐标系,以 P_3 点为原点, X 轴正方向为传送带运动方向,利用坐标点反正切函数可求取像素坐标系与传送带坐标系 Z 轴夹角 γ :

$$\gamma = \arctan \left[\frac{v_2 - v_1}{2(\mu_2 - \mu_1)} + \frac{v_3 - v_2}{2(\mu_3 - \mu_2)} \right]. \quad (8)$$

然后可求得由传送带坐标系与像素坐标系的旋转平移矩阵 H_C^W 。

4.2 传送带与机器人标定

使编码器读数归零,匀速转动传送带使标定板从 P_3 位置移动至机器人工作区域位置 P_4 (见图 10)。

为避免机器人末端接触指定点的误差干扰,利用标定针引导机器人末端准确地进入标定孔,读取机器人坐标和编码器读数。移动至后部 P_5 ,记录 P_4 至 P_5 的移动距离,求出传送带坐标系与机器人坐标系的转换关系。标定多个机器人时,需重新从 P_3 位置进行标定,重复以上操作,减小累积误差。

4.3 试验分析

利用文中介绍的标定方法,图像采集过程如图 11 所示。通过标定试验,映射因子为 0.128 mm/pix。

手眼转换矩阵为:

$$H_C^R = \begin{bmatrix} -0.001485 & 0.9988 & -381.6290 \\ 0.9999 & -0.001501 & 1929.5300 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}.$$

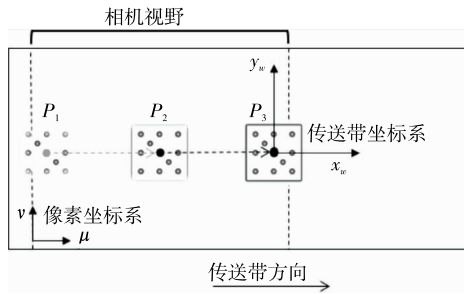


图 9 相机视野与传送带平面关系

Figure 9 Camera field of view and conveyor plane

为准确地评价该方法的标定精度,取 10 颗大小不等花生分别固定于传送带上,在相机视野下进行拍照,匀速转动传送带至机器人工作区内,计算得出机器人坐标系下的坐标位置与标定孔的实际坐标位置,进行 10 次重复试验。由表 1 可知,试验标定方法最大偏差为 0.93 mm,理论点与实际点的欧氏距离平均值为 0.46 mm,远高于传统手眼标定精度。

取 100 粒大小不等的花生进行有无高度补偿对比抓取试验,记录机器人抓取成功率。试验表明系统平面重复定位误差可控制在 ± 1 mm,添加高度补偿值后,抓取

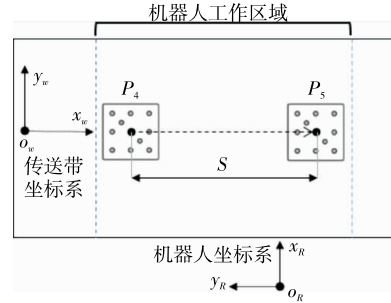


图 10 机器人工作区域与传送带平面关系

Figure 10 Robot working area and conveyor plane

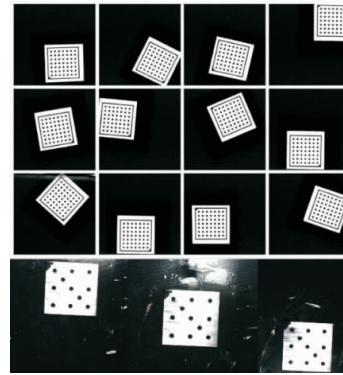


图 11 标定过程图像采集

Figure 11 Image acquisition in calibration process

表 1 标定试验数据

Table 1 Data of calibration experiment mm

序号	实际坐标位置		试验标定后计算坐标位置		偏移距离	重心高度补偿
	X	Y	X	Y		
1	-184.816	428.971	-185.212	429.000	0.400	3.80
2	-322.662	348.475	-323.198	349.370	0.550	4.37
3	-345.361	404.018	-345.349	404.300	0.280	2.78
4	-166.280	530.569	-165.382	530.810	0.930	4.91
5	-163.689	499.844	-163.601	499.870	0.092	2.77
6	-213.690	455.626	-213.442	455.790	0.300	4.44
7	-218.901	450.672	-218.917	450.890	0.220	4.65
8	-191.630	492.404	-192.495	492.140	0.900	2.13
9	-309.797	360.539	-310.040	360.990	0.510	2.00
10	-325.790	368.981	-325.358	369.340	0.560	3.10

成功率由 87% 提高至 97%，能够满足传送带分拣要求。

微小误差可能来源：传送带传输过程中不稳定，出现左右摆动问题；花生传输过程中与传送带发生相对滑动；编码器脉冲读数不准确，导致传输方向误差；通讯模式有延迟等问题。

5 结论

根据花生生产线现场操作条件，改进了传统手眼标定方法，利用专门定制的“9+2”标定块进行平面标定，并对花生处理提取轮廓信息，进行重心高度补偿。结果表明，该标定方法便于在生产现场实际操作，降低了传统手眼标定矩阵求解难度，可满足基于传送带作业的机器人分拣精度要求。但对于相机、传送带平整度及安装精度要求较高的，需后期对此方面问题继续探索，使之得到广泛应用。

参考文献

[1] 杨少荣. 机器视觉算法与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2008：378-443.

[2] LEE K M. Machine vision[M]. Taylor and Francis; CRC Press, 2015：15-33.

[3] XIA Ke, WENG Zheng-xin. Workpieces sorting system based on industrial robot of machine vision [C]// International Conference on Systems & Informatics. [S.L.]: IEEE, 2016：422-426.

[4] 尹双双, 姜海勇, 李娜, 等. 花生负压分级试验[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 86-89.

[5] TSAI R Y, LENZ R K. A new technique for fully auto-

mous and efficient 3D robotics hand-eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358.

[6] 胡寒. 基于机器视觉的 Delta 机器人动态抓取系统关键技术的研究[D]. 广州：广东工业大学，2019：34-38.

[7] 李楠, 平雪良, 王晨学, 等. 一种机器人的平面约束自标定技术研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(8): 1 214-1 222.

[8] 许国树, 言勇华. 一种基于场景特征的工业机器人手眼自动标定方法[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(6): 17-21.

[9] 郭新年, 白瑞林, 王秀平. 基于主动视觉的手眼矩阵和光平面标定方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(19): 56-60.

[10] LIU Kun, LIU Wei-dong. Detection algorithm for infrared dim small targets based on weighted fusion feature and ostu segmentation[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 253-260.

[11] 张凯. 花生米品质分选系统的关键技术研究[D]. 济南：山东大学，2019：26-32.

[12] 张墨逸, 张秋余, 段宏湘, 等. 基于运动轨迹的单目相机位姿自标定方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 64-69.

[13] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1 330-1 334.

[14] FITZGIBBON A W, PILU M, FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses[J]. IEEE Trans on Pami, 1996, 21(5): 253-257

[15] 杨麒, 李天伟, 黄谦, 等. 基于直线投影特征的镜头畸变校正方法[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(9): 264-268.

(上接第 157 页)

地坪立柱散冷量。立柱保温更能削弱散冷量、改善地坪温度状况。但环境因素往往是多变的，各种环境因素作用下的散冷量和地坪冻胀问题还有待进一步研究。

参考文献

[1] 冷库建筑保温系统设计技术与发展探讨[J]. 物流工程与管理, 2017, 39(10): 76-79.

[2] 刘金平. 5 000 吨组装式冷库地坪保温及防冻性能测试研究[J]. 制冷, 1994, 48(3): 7-12.

[3] 高祖锟. 冷库地坪防冻机械通风的传热计算[J]. 暖通空调, 1996(4): 68-71.

[4] 贾景福, 郝满晋, 赵建华. 通风流速对冷库地坪通风防冻系统传热性能影响的研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2009,

128(30): 57-60.

[5] 陈曦, 王军, 毕文峰. 设计参数对冷库地坪通风防冻系统性能的影响研究[J]. 低温与超导, 2016, 44(10): 58-61.

[6] 孙小红, 满林香. 冷库地坪通风散冷管道的数值模拟与优化[J]. 低温与超导, 2020, 48(2): 75-79, 106.

[7] 羊焯, 鲍莉. 运用有限元法计算热桥对围护结构热工性能的影响[J]. 建筑结构, 2016, 43(3): 59-60, 62.

[8] 沈张. 基于 COMSOL 仿真技术在热桥中三维传热研究及节能利用[M]. 武汉：武汉轻工大学，2017：1-57.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 冷库设计规范: GB 50072—2010[S]. 北京：中国计划出版社，2010：6, 16, 124.

[10] 蒋小强, 张黎辉, 谢尚桢. 冷库柱体冷桥的形成机理及其保温方案的优化[C]//福建省制冷学会学术年会论文集. 成都：工程科技, 2018: 104-114.

(上接第 163 页)

[18] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. Computer Science, 2015(7): 1 409-1 556.

[19] BAKHODAA, YUAN G L, FUNG W W L, et al. Analyzing CUDA workloads using a detailed GPU simulator[C]//

2009 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software. [S.L.]: IEEE, 2009: 163-174.

[20] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston: IEEE, 2015: 1-9.