

激光与光电子学进展

对机械手定位的全相位傅里叶变换相位式
激光测距系统

詹道桦, 王晗, 林健, 钟辉宇, 潘艺良, 陈焜*

广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 针对机械手中用于标定以及空间定位的激光测距装置测距精度不足、容易受工作环境等因素的影响,进而导致测量不准确,影响机械手空间标定以及定位的缺点,提出了一种基于全相位傅里叶变换(apFFT)的相位式激光测距系统。该系统采用 apFFT 算法来进行鉴相,进而得出实时测量的距离。相比于传统的基于傅里叶变换的相位式激光测距方法,该方法能够有效抑制实际应用中由于多种因素导致的频谱泄露现象。实验结果表明,该系统具有良好的稳定性和抑制频谱泄露能力,同时该系统的平均定位精度可以达到 1 mm,满足实际工业生产制造的需求。

关键词 仪器,测量与计量;相位式激光测距仪;频谱泄露;全相位傅里叶变换

中图分类号 TH711

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220571

Phase Laser Ranging System Based on All-Phase Fourier Transform for
Manipulator Positioning

Zhan Daohua, Wang Han, Lin Jian, Zhong Huiyu, Pan Yiliang, Chen Xun*

School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, Guangdong, China

Abstract Laser distance measurement devices used for the space calibration and positioning of manipulators are easily affected by factors such as the work environment owing to their insufficient ranging accuracies. This leads to inaccurate measurements and shortcomings in the space calibration and positioning of manipulators. This article presents a phase laser ranging system based on the all-phase Fourier transform (apFFT). The proposed system uses the apFFT algorithm for phase discrimination and obtains the real-time measured distance. Compared with the Fourier-transform-based traditional phase laser ranging method, the proposed method can effectively suppress the spectrum leakage caused by various factors in practical applications. The experimental results reveal that the system exhibits good stability and can suppress spectrum leakage. Furthermore, the average positioning accuracy of the proposed system can reach 1 mm, which satisfies the requirements of actual industrial manufacturing.

Key words instruments, measurement and metrology; phase laser rangefinder; spectrum leakage; all-phase Fourier transform

1 引言

如今,在制造强国战略的实施推动、“中国制造 2025”纲领不断践行的大环境下,我国的工业实体制造行业逐渐从发展期走向成熟期,从传统制造走向智能制造^[1-2]。工业机械手作为实现工业自动化、现代化、智能化当中不可缺失的关键环节,其发展越来越受到人们的

关注^[3-4]。而在工业机械手行业中,对机械手的标定以及空间定位是至关重要的一步。标定工作可以帮助机械手自动计算出目前所处的空间位置,准确定位工件的位置,从而完成后续的控制工作^[5]。如何准确实现标定以及空间定位成为了工业智能制造领域中最具挑战的问题之一^[6]。激光测距技术由于其具有测量速度快、实时性好、测量精度高、可靠性高等优点,在机械手标定以及

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-03-05; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(62171142)、广东省自然科学基金(2021A1515011908)

通信作者: *xunchen@gdut.edu.cn

工件识别定位领域的应用变得越来越广泛^[7-9]。

在工业机械手领域中,基于激光测距的标定以及空间定位已有了不少的研究。周旭^[10]提出了一种基于视觉和激光雷达融合定位识别的机械臂抓取系统,提升了机械臂系统的稳定性。陈守恒等^[11]提出了一种基于三角激光的机械手三维抓取系统,解决了市面上视觉定位产品质量良莠不齐,无法适应实际生产中复杂多变环境的问题。方海燕等^[12]提出了一种非接触式测量机器人的自标定方法。然而,基于激光测距的标定以及空间定位技术中,大多数都是使用相位式激光测距中的傅里叶变换(FFT)法来鉴相的。尽管FFT法相对于相位式激光测距中的自动数字鉴相法和数字相关法,有着运算量小、适应性好、测量精度高等优点,但是在实际应用中,FFT法也存在两个缺陷:1)只有当采样频率为FFT频率间隔的整数倍时,测出的相位才准确,否则会出现“不同步采样”情况而使得测出的相位不准,进而影响最终测距的结果^[13-14];2)在使用FFT法进行鉴相时,需要先对参考信号还有测量信号做采样和截断处理,然而用于做处理的窗函数在实际使用中无法达到理想的冲击函数状态,导致最终测得的部分频谱线会落在理想区间外,造成了频谱泄漏现象^[15]。而机械手实际的工作环境恶劣且多变,不仅会放大上述两个缺陷所导致的后果,而且也会增加其出现的概率。

本文针对机械手中的标定及空间定位,提出了一种基于全相位傅里叶变换(apFFT)的相位式激光测距系统,以解决基于FFT鉴相法的相位式激光测距装置在实际使用中容易出现不同步采样以及频谱泄漏的问题,从而提升机械手标定系统的稳定性以及准确性,同时避免使用附加的校正措施,减少系统的冗余度^[16]。

2 基于 apFFT 的相位式激光测距系统构成

针对机械手定位的 apFFT 的相位式激光测距系

统的硬件部分由机械臂、红外激光发射装置、回波接收单元、STM32F103 微机、计算机等组成,如图 1 所示。

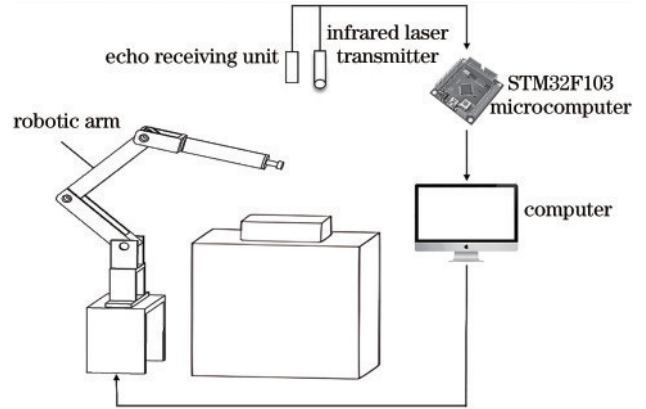


图1 系统整体构成

Fig. 1 Overall composition of system

其中,激光发射装置、回波接收单元与STM32F103微机共同组成激光测距系统,实现实时测量工件与回波接收器之间的距离,STM32F103微机则对回波接收单元采集到的信号做运算处理,转换成距离信息。计算机则通过与STM32F103微机通信获取到处理后的距离数据,再通过采集到的距离数据对机械手做出相应的控制。本文的整体系统使用VS2010和Keil μ Vision5两款软件联合开发,实现不同运行环境下的信息交互。

3 apFFT 激光测距系统的算法构成

3.1 相位式激光测距

相位式激光测距是使用特定的调制信号对发射光波的光强进行调制,利用特定的“调制光波”往返于被测物体后所形成的相位差,间接求得待测距离。如图 2 所示,为相位式激光测距原理图。

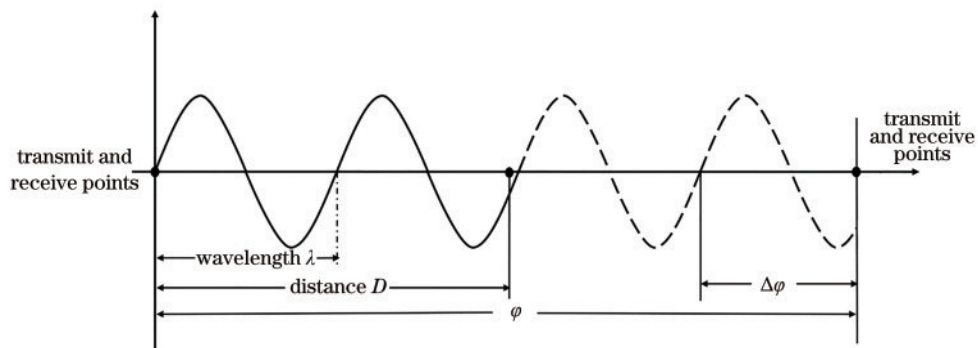


图2 相位测距原理图

Fig. 2 Phase ranging schematic

待测距离 D 可以由下面公式求得:

$$D = \frac{1}{2} ct, \quad (1)$$

式中: c 为光速, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s; t 为调制光往返一

次所需的时间。假设调制光的频率为 f , 调制信号的波长为

$$\lambda = c/f. \quad (2)$$

在待测距离 D 上往返一次产生的相位延迟为 φ , 则其对应的时间差为

$$t = T \times \varphi / 2\pi, \quad (3)$$

式中, T 为调制光周期。而周期 T 与调制信号的频率 f 恰好有如下的关系:

$$T = 1/f. \quad (4)$$

所以结合式(1)~(4), 待测距离 D 可以表示为

$$D = \frac{1}{2} ct = \frac{1}{2} \frac{c}{f} \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = L_s (N + \Delta N), \quad (5)$$

式中: $L_s = \lambda/2$ 代表各频率下的测尺长度; N 是 φ 除以 2π 的整数; ΔN 是 φ 除以 2π 之后的余数。

3.2 精测测尺与粗测测尺

在实际应用当中, 式(5)中的 ΔN 可以被测出来, 但 N 是无法测出的, 这是因为, 无论是使用 FFT 或 apFFT, 都只能得出 φ 除以 2π 的余数, 而无法得出 φ 除以 2π 的整数倍。为解决这一问题, 必须采用多个频率来测定同一距离, 该频率即为测尺频率。若被测距离小于测尺长度, 则 $N=0$ 。但实际上, 在测尺精度一定时, 测尺频率越低, 测量误差越大, 这在高精度测距中是不允许的。与之相对应, 测尺频率选择得越高, 虽然测量精度提高, 但此时的 N 值将大于 1, 无法解决测程问题。为解决这一矛盾, 在实际应用中通常选择一个决定仪器测距精度的测尺和决定测尺的几个辅助测尺, 分别称之为精测测尺和粗测测尺。

当使用多个精测测尺和粗测测尺进行距离测量时, 假定测尺长度依次为 $(L_{s1}, L_{s2}, L_{s3} \dots \text{且 } L_{s1} > L_{s2} > L_{s3} > \dots)$, L_{s1} 大于被测距离, 所以 $N=0$, 有

$$D_1 = L_{s1} \times \Delta N_1. \quad (6)$$

将第一级测尺计算距离代入第二级测尺的计算结果, 有

$$D_2 = L_{s2} \left[\text{int} \left(L_{s1} \times \frac{\Delta N_1}{L_{s2}} \right) + \Delta N_2 \right], \quad (7)$$

式中, $\text{int}()$ 为取整函数。依此类推, 第 i 级计算结果为

$$D_i = L_{si} \left[\text{int} \left(\frac{D_{i-1}}{L_{si}} \right) + \Delta N_i \right]. \quad (8)$$

这样, 层层递推计算, 即可运用多个精测测尺和粗测测尺得到最终测量的距离。

3.3 apFFT 法

apFFT 法是将采集到的信号先进行全相位预处理, 再对处理后的信号做 FFT 变换, 然后求出的频谱线当中数值最大的频谱线所对应的相位即为鉴别结果。

而其中, 全相位预处理的过程为: 对于长度为 $2N-1$, 数据中心点为 $X(0)$ 的数据序列 $X(n) = [X(N-1), \dots, X(0), \dots, X(-N+1)]$, 构建 N 点的 Hanning 窗, 并对自身进行卷积运算, 从而求得

$2N-1$ 的卷积窗 win1 ; 接着对 win1 的所有点进行求和, 然后对 win1 卷积窗中的 $2N-1$ 个点做归一化处理, 从而得到归一化后的卷积窗 win2 ; 然后 $2N-1$ 个将待测数据与 win2 一一相乘, 从而得到了加窗后的 $2N-1$ 项; 此后将第一个数与每隔 N 个数的项两两相加, 最终得到长度为 N 的序列。之后对上述处理后的序列进行 FFT 运算, 即可获取最终的 apFFT 处理结果^[17]。apFFT 整体的算法流程如图 3 所示。

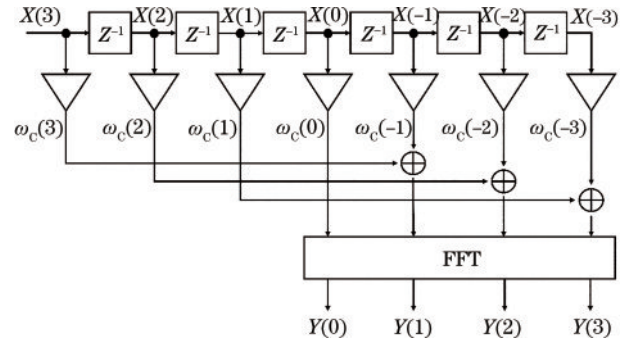


图 3 apFFT 整体算法流程图

Fig. 3 Overall algorithm flow chart of apFFT

从图 3 中可以看出, 本次采用的 apFFT 算法, 需要采集的数据较传统 FFT 多一倍, 但抗噪声能力比较好, 且对信号采集没有同步采样的苛刻要求, 无需附加的相位校正措施。可以看出, apFFT 只需用长为 $2N-1$ 的卷积窗 ω , 对原始数据加权, 然后将间隔为 N 的数据两两叠加(中间元素除外), 再对这 N 个数据进行传统 FFT 即可得到 apFFT 结果。

4 实验结果与分析

4.1 实验平台搭建

根据系统功能需求, 本文搭建了相应的实验平台, 实验系统硬件构成如图 1 所示。而本文的实验平台当中, 激光测距系统的软件算法流程需要包括配置模块、apFFT 算法实现模块、粗测测尺计算模块和被测距离合成模块等 4 个模块。如图 4 所示, 为激光测距实验系统的软件算法流程图。具体的软件算法流程为: 系统上电之后, 控制模块开始自动检测模拟开关上升沿信号(系统中设置, 当校准检测按键按下时为上升沿信号)。当检测到上升沿信号时, 系统开始根据之前预设好的采样频率和采样时长, 配置好模拟数字(AD)转换模块进行信号采集; 由于本文系统引入 4 个精测测尺频率, 而针对每个测尺频率, 测距系统的内外光路都需要分别进行测量, 因此本文系统每次都会在 AD 转换后提取到 8 组数据, 使用 apFFT 算法计算得出 8 组数据的相位值, 此后内外光路相位相减即可得出相位差; 此后通过上述 4 个精测测尺的相位差, 即可计算得出另外 6 个粗测测尺的相位差; 最后通过测尺衔接算法, 将 10 个测尺数据合成为最终精确的距离值。

而在激光测距实验系统当中, 还需引入精测测尺

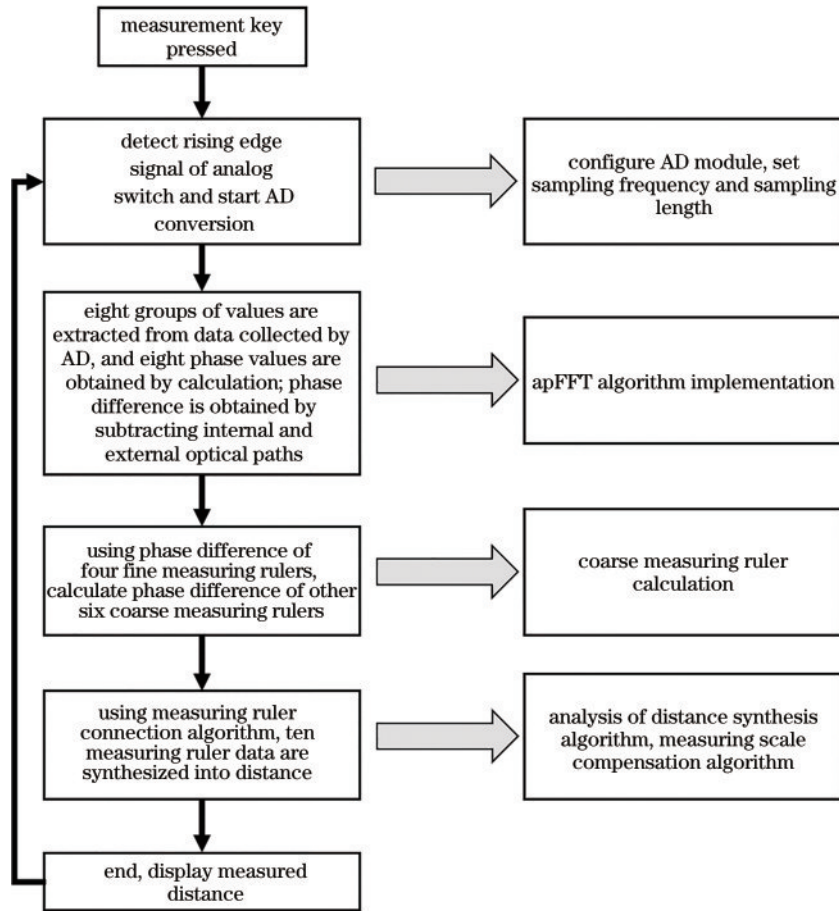


图 4 激光测距实验系统软件算法流程图示意图

Fig. 4 Schematic diagram of software algorithm flow chart of laser ranging experiment system

与粗测测尺。本实验使用的精测测尺调制频率分别为 200、160、153、152 MHz；粗测测尺调制频率分别为 48、47、40、8、7、1 MHz。如表 1 所示，为本文实验使用的所有精测测尺与粗测测尺频率及其最大测量长度。

表 1 精测测尺与粗测测尺

Table 1 Fine measuring ruler and coarse measuring ruler

Modulation frequency /MHz	Ruler length /m	Measurement accuracy /mm
200	0.7500	0.7500
160	0.9375	0.9375
153	0.9805	0.9805
152	0.9870	0.9870
48	3.1250	3.1250
47	3.1915	3.1915
40	3.7500	3.7500
8	18.7500	18.7500
7	21.4285	21.4285
1	150.0000	150.0000

由于在实际工业环境当中，激光测距装置的鉴相性能容易受到环境以及其他因素的影响，导致出现频率偏移和高斯噪声，从而影响了激光测距装置的鉴相

性能，出现频谱泄漏现象，并最终影响了激光测距装置的测距性能。因此接下来本文将展开实验验证基于 apFFT 的相位式激光测距系统的优点以及可行性。本文实验均在室内进行，室温保持 25℃，室内的平均照度为 120 lx。为验证 apFFT 相位式激光测距法的性能，本文选用相位式激光测距法中性能最优的 FFT 鉴相法作为实验效果参照对象。FFT 的采样点数为 64 点，而 apFFT 的采样点数为 127 点（因为 apFFT 使用 127 点经过全相位预处理后为 64 点，与 FFT 一致）。

4.2 频率偏移影响下的鉴相性能

本实验在归一化后，频率偏移量范围为 $\delta \in [-0.1, 0.1]$ 的区间进行实验，其中每间隔 0.01 个偏移量采集实验数据，在每一个归一化偏移量下做 100 次实验采集数据，并求出在该位置下的平均偏移量。如图 5 所示为鉴相标准差与频率偏移量之间的统计结果。

由图 5 的统计结果可知：随着偏移量 δ 逐渐远离零点，即归一化频移量逐渐增大，FFT 鉴相法的鉴相偏移量也逐渐增大；而随着归一化频移量逐渐增大，apFFT 鉴相法的鉴相偏移量基本不变，鉴相结果仍然准确。

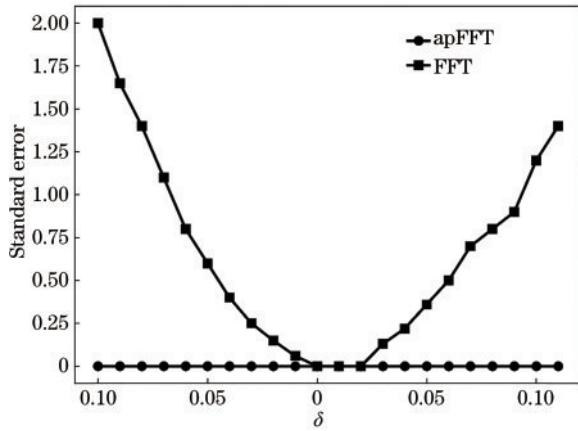


图 5 归一化频移与鉴相偏差统计结果图

Fig. 5 Statistical results of normalized frequency shift and phase discrimination deviation

4.3 频率偏移和高斯白噪声影响下的鉴相性能

本实验在测量信号的信噪比为 25 dB, 归一化频移量范围为 $\delta \in [-0.1, 0.1]$ 时, 每隔 0.01 个间距变化一次, 在每一个归一化频移量下做 100 次实验采集数据, 并求出在每一个频移量下的平均标准差。如图 6 所示为频率偏移叠加高斯白噪声共同影响下, 鉴相标准差与频移量之间的统计结果。

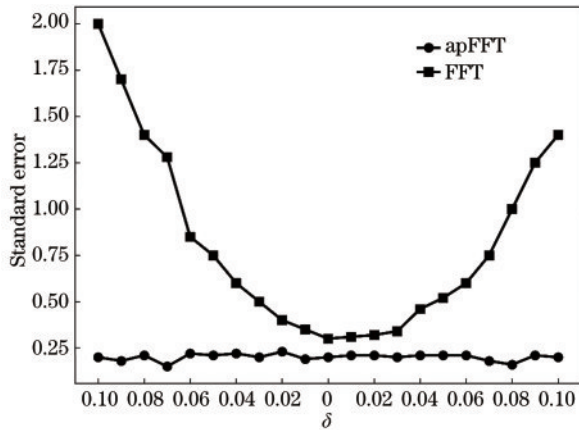


图 6 频率偏移叠加高斯白噪声共同影响下归一化频移与鉴相偏差统计结果图

Fig. 6 Statistical results of normalized frequency shift and phase discrimination deviation under joint influence of frequency shift and Gaussian white noise

由图 6 的统计结果可知: 在高斯白噪声信噪比为 25 dB, 归一化频移量 $\delta \in [-0.1, 0.1]$ 范围内时, 无论归一化频移量为多少, apFFT 法都比 FFT 法的标准差更小、鉴相更为精准。

4.4 基于 apFFT 相位式激光测距系统的精度验证

根据测试要求, 本文实验采用自制的基于 apFFT 的相位式激光测距仪系统来进行精度验证实验。实验过程中, 分别在不同距离下测 10 次数据, 从而得出平均测距结果。所测得的数据如表 2 所示。

表 2 测距结果

Table 2 Ranging results

Actual distance /m	Average ranging result /m	Maximum difference /mm
0.25	0.2502	1
0.50	0.5000	0
0.75	0.7490	1
1.00	1.0003	1
2.00	2.0000	0
4.00	4.0000	0
6.00	6.0002	1
8.00	8.0000	0
10.00	10.0000	0
12.00	12.0000	0
14.00	14.0000	0
16.00	16.0006	1
18.00	18.0000	0
20.00	20.0000	0

上述的实验结果表明: 研究的针对机械手定位的 apFFT 的相位式激光测距系统, 其测距精度可以控制在 ± 1 mm 以内, 满足实际的工业使用需求。

5 结 论

在充分考虑机械手工作环境恶劣且多变, 同时考虑相位式激光测距容易出现频谱泄漏的缺点, 提出了针对机械手定位的 apFFT 相位式激光测距系统, 解决了传统测距装置测距精度不足、容易受工作环境等因素的影响, 进而导致测量不准确, 影响机械手空间标定以及定位的问题。实验结果表明: 该系统的实际最大误差可控制在 1 mm 以内, 具有较高的精度, 可以满足实际工业生产的需求, 十分贴近自动化产线上的实际应用场景。

而该系统不仅可以运用在工业机械手激光标定上, 也可以运用到其他的基于相位式激光测距的系统当中。当然本文也存在一定的局限性, 仅在频率偏移和高斯白噪声这两种情况下验证了基于 apFFT 的激光测距系统的可行性与稳定性。然而实际应用当中, 机械手有时候会遇到环境光线过于复杂, 从而影响激光测距系统当中回波接收单元对发射出的激光信号的接收。针对这种情况, 单靠本文的 apFFT 激光测距系统还无法完美解决此问题, 后续可以通过软硬件的结合配合新的算法来克服此种环境的影响。

参 考 文 献

- [1] 黄群慧, 贺俊. 中国制造业的核心能力、功能定位与发展战略: 兼评《中国制造 2025》[J]. 中国工业经济, 2015 (6): 5-17.
Huang Q H, He J. The core capability, function and strategy of Chinese manufacturing industry-comment on

- “Chinese manufacturing 2025” [J]. *China Industrial Economics*, 2015(6): 5-17.
- [2] 周济. 智能制造: “中国制造 2025” 的主攻方向[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273-2284.
Zhou J. Intelligent manufacturing-main direction of “made in China 2025” [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [3] 卢月品. 解读《中国机器人产业发展白皮书(2016 版)》[J]. *机器人产业*, 2016(3): 26-32.
Lu Y P. Interpretation of the white paper on the development of China’s robot industry (2016 edition)[J]. *Robot Industry*, 2016(3): 26-32.
- [4] 武文卿. 解读《中国机器人产业发展白皮书》[J]. *中国招标*, 2016(24): 15-17.
Wu W Q. Interpretation of the white paper on the development of China’s robot industry[J]. *China Tendering Weekly*, 2016(24): 15-17.
- [5] 马晓燕, 张永胜. 基于视觉标定的包装搬运机器人定位方法[J]. *包装工程*, 2019, 40(21): 211-215.
Ma X Y, Zhang Y S. Positioning method of package handing robot based on visual calibration[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(21): 211-215.
- [6] Wang X Y, Zhou B, Ji J Y, et al. Recognition and distance estimation of an irregular object in package sorting line based on monocular vision[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(1): 172988141982721.
- [7] Jin X J, Jung J, Ko S Y, et al. Geometric parameter calibration for a cable-driven parallel robot based on a single one-dimensional laser distance sensor measurement and experimental modeling[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2392.
- [8] HuangFu Y B, Hang L B, Cheng W S, et al. Research on robot calibration based on laser tracker[M]//Zhang X M, Wang N F, Huang Y J. Mechanism and machine science. Lecture notes in electrical engineering. Singapore: Springer, 2016, 408: 1475-1488.
- [9] 冯凯斌, 汤儒峰, 李荣旺, 等. 深度学习在卫星激光测距数据处理中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0407001.
Feng K B, Tang R F, Li R W, et al. Application of deep learning in data processing of satellite laser ranging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0407001.
- [10] 周旭. 基于视觉和激光雷达融合定位识别的机械臂抓取系统研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2020.
Zhou X. Research on manipulator grab system based on fusion position recognition of vision and lidar[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
- [11] 陈守恒, 谢珩, 刘镇海, 等. 基于三角激光的机械手三维抓取系统[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(21): 96-103.
Chen S H, Xie H, Liu Z H, et al. 3D grasping system of manipulator based on triangle laser[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(21): 96-103.
- [12] 方海燕, 郭俊杰, 杨军良, 等. 非接触式测量机器人的自标定研究[J]. *制造技术与机床*, 2004(3): 36-40.
Fang H Y, Guo J J, Yang J L, et al. A self-calibration method for noncontact robotic measuring system[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2004(3): 36-40.
- [13] Kuo S M, Lee B H. The fast Fourier transform and its applications[M]. London: Prentice Hall, 1988.
- [14] Lü W T, Shen C, Gui F, et al. Real-time spectrum analyzer based on all phase FFT spectrum analysis[C]//2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, June 29-30, 2013, Shinan, China. New York: IEEE Press, 2013: 966-969.
- [15] 邢云路, 李尚远, 薛晓晓, 等. 高频宽带分布相参微波光子成像雷达研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1517003.
Xing Y L, Li S Y, Xue X X, et al. High-frequency broadband-distributed coherent-aperture microwave photonic imaging radar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1517003.
- [16] 王兆华, 侯正信, 苏飞. 全相位 FFT 频谱分析[J]. *通信学报*, 2003(B11): 16-19.
Wang Z H, Hou Z X, Su F. All-phase FFT spectrum analysis[J]. *Journal on Communications*, 2003(B11): 16-19.
- [17] Kou K, Wang C, Liu Y. All-phase FFT based distance measurement in laser self-mixing interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106611.