

基于扩展卡尔曼滤波的光电扫描动态坐标测量算法研究

黄喆 杨凌辉* 赵子越 任瑜 郝继贵 叶声华

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 车间测量定位系统(wMPS)是一种新型的光电扫描分布式测量系统。为提高其动态坐标测量精度,对wMPS的动态坐标测量原理进行了介绍。以扩展卡尔曼滤波算法(EKF)为基础,建立了匀速直线运动模型。并对模型及算法进行了计算机仿真,结合仿真结果,以ABB IRB 2400工业机器人为实验平台,对所提出的方法进行了实物实验验证。实验结果表明:所应用的EKF算法不但可以替代传统的最小二乘算法,实现对运动物体轨迹的估计,还可以减少wMPS动态测量过程中的随机误差,提高精度,完全满足工业现场对移动物体测量定位的需求。

关键词 测量;车间测量定位系统;扩展卡尔曼滤波;动态坐标测量;光电扫描

中图分类号 TB92 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.051201

Research on Optoelectronic Scanning Dynamic Coordinate Measurement Algorithm Based on Extended Kalman Filter

Huang Zhe Yang Linghui Zhao Ziyue Ren Yu Zhu Jigui Ye Shenghua

*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*

Abstract Workshop measuring and positioning system (wMPS) is a new kind of distributed coordinate measuring system based on photoelectric scanning. In order to further improve the dynamic coordinate measuring precision of wMPS, a brief introduction of wMPS dynamic coordinate measurement principle is presented. Based on the algorithm of extended Kalman filter (EKF), the model of uniform linear motion is established. Afterwards model and algorithm are simulated with computer. Based on the simulation results, the proposed method is verified experimentally, using ABB IRB 2400 industrial robot as the experiment platform. Experimental results indicate that the EKF algorithm can not only substitute the traditional least squares algorithm and estimate the trajectory, but also reduce the dynamic random errors in the measurement process and improve the system positioning accuracy. The proposed algorithm basically meets the requirements of industrial field measurement for dynamic object positioning.

Key words measurement; workshop measurement and positioning system; extend Kalman filter; dynamic coordinate measurement; photoelectric scanning

OCIS codes 120.3940; 140.3460; 120.3930

收稿日期: 2015-11-16; **收到修改稿日期:** 2015-12-10; **网络出版日期:** 2016-04-15

基金项目: 国家科技重大专项子课题(2014ZX04001-081-06)、大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研究基金(JMTZ201604)

作者简介: 黄喆(1989—),男,博士研究生,主要从事几何量精密测量及室内导航方面的研究。

E-mail: huangzhe@tju.edu.cn

导师简介: 叶声华(1934—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事激光及光电测试技术方面的研究。

E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: icelinker@tju.edu.cn

1 引言

在大型装备制造现场中,空间三维坐标的动态实时测量系统被越来越广泛地应用到大部件对接^[1]、机器人引导及自动导引运输车(AGV)导航^[2]等领域。随着激光及光电测量技术的飞速发展^[3-6],国外可以提供现场动态空间三维坐标测量并基于光学原理的产品较为成熟,如尼康公司的 iGPS^[7]及 GSI 公司的 V-STATSD^[8]等。尽管这些产品可以满足工业现场精密动态测量的高精度需求,但价格昂贵、功能单一,限制了其在国内的进一步推广。相比于国外,国内相关技术尚处于发展阶段,目前还没有稳定可靠的同类产品与国外相抗衡,诸多高校和科研院所正在积极努力地进行研究及实验。在诸多测量手段中,工作空间测量定位系统(wMPS)^[9]是一种基于光电扫描的新型分布式坐标测量系统。它主要由分布于空间合适位置的多个旋转激光发射站及固联在被测物上的光电接收器组成。相比于其他测量方式,其具有工作范围大、覆盖范围广及多任务工作能力的独特优势,现已成功应用于航空、航天及造船^[10]等领域。目前,天津大学精密测试及仪器国家重点实验室科研团队对 wMPS 静态坐标测量性能已作了诸多研究,取得了一定成果^[11-12]。进而,如何提高其动态坐标测量精度,成为 wMPS 能否更加深入应用于工业现场中的关键问题。

卡尔曼滤波(KF)作为一种最优状态估计方法,现已被广泛应用于工业、控制及动态测量领域^[13-14]。KF 是一个不断地预测、修正的递推过程,在求解时不需要存储大量的观测数据,并且当得到新的观测数据时,可随时算得新的滤波参数值,便于实时地处理观测结果,因此被越来越多地应用于动态定位数据处理中^[15]。由于设计 KF 过程是用于估计线性模型中的状态向量,对于非线性模型,通常在推导滤波方程时,增加线性化步骤:在状态估计及预测步骤中,对系统方程在前一状态估计值和量测方程在相应的预测位置也进行线性泰勒近似,所得到的 KF 过程称为扩展卡尔曼滤波(EKF)。由于 wMPS 通过发射站发出的多个激光平面方程作为基本测量方程,以接收器相对于发射站坐标系的扫描角为观测量,结合最小二乘原理,求解接收器的空间三维坐标。通过文献^[16]可知,观测量与待求解的三维坐标变成非线性关系。为实现通过观测量直接对空间三维坐标进行最优估计,EKF 相比于 KF 更加适合应用于 wMPS 中。

本文对 wMPS 动态坐标测量系统进行简要介绍,基于发射站激光平面的非线性测量模型,建立了 EKF 滤波方程。在此基础上,进行了仿真实验及实物实验,充分证明了本文算法具有很强的应用价值,可直接应用于 wMPS 实时动态坐标测量的滤波过程。

2 wMPS 动态坐标测量系统

wMPS 系统如图 1 所示,由发射站、接收器、信号处理器及终端计算机组成,系统工作原理可参阅文献^[17]。当接收器在发射站的测量范围内运动时,系统能够以 30 Hz 的频率实时获取接收器在 wMPS 坐标系下的空间三维坐标。

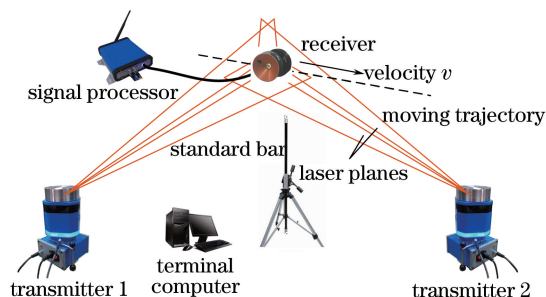


图 1 wMPS 动态坐标测量系统

Fig. 1 wMPS dynamic coordinate measuring system

天津大学端木琮等^[18]以接收器的空间三维坐标(X, Y, Z)为观测量,对接收器的实测坐标值进行 KF,使系统的动态测量精度在一定程度上得到了提升。然而,wMPS 的初始观测量为发射站的扫描角度,由于扫描角度与三维坐标之间呈现非线性关系,并且扫描角度与三维坐标共存于一个测量方程中,很难互相显式表示。

3 算 法

3.1 wMPS 系统测量基本方程

为简化分析过程,以双发射站测量系统为例。选定 1 号发射站为主站(wMPS 坐标系建立于此),如图 1 所示。当发射站的激光平面扫过接收器时,系统的测量方程(激光平面方程)为

$$a_{im}(\theta_{im})x_i + b_{im}(\theta_{im})y_i + c_{im}(\theta_{im})z_i + d_{im}(\theta_{im}) = 0; m, i \in (1, 2), \quad (1)$$

式中 i 代表发射站号, m 代表光平面序号, θ_{im} 表示接收器相对于第 i 个发射站的第 m 个激光平面的扫描角度,即为测量系统的初始观测量。(1)式中的光平面方程系数为

$$\begin{bmatrix} a_{im}(\theta_{im}) \\ b_{im}(\theta_{im}) \\ c_{im}(\theta_{im}) \\ d_{im}(\theta_{im}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_{im}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{im} \\ b_{im} \\ c_{im} \\ d_{im} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{R}(\theta_{im}) = \begin{pmatrix} \cos \theta_{im} & -\sin \theta_{im} & 0 \\ \sin \theta_{im} & \cos \theta_{im} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

(3)式为发射站旋转头绕 Z 轴转动的旋转矩阵,则(2)式可以表示为

$$\begin{bmatrix} a_{im}(\theta_{im}) \\ b_{im}(\theta_{im}) \\ c_{im}(\theta_{im}) \\ d_{im}(\theta_{im}) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{im} & -\sin \theta_{im} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{im} & \cos \theta_{im} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{im} \\ b_{im} \\ c_{im} \\ d_{im} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式得:

$$(a_{im} \cos \theta_{im} - b_{im} \sin \theta_{im})x_i + (a_{im} \sin \theta_{im} + b_{im} \cos \theta_{im})y_i + c_{im}z_i + d_{im}; i, m \in (1, 2), \quad (5)$$

(5)式即为 wMPS 单平面测量方程,令:

$$\begin{aligned} l_{ij}(x_i, y_i, z_i, \theta_{ij}) &= (a_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij})x_i + \\ & (a_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij})y_i + c_{ij}z_i + d_{ij} = 0; i, j \in (1, 2), \end{aligned} \quad (6)$$

则动态过程中的 EKF 算法即可通过(6)式实现。

3.2 EKF 算法

一个不一定是线性系统的状态空间描述称为非线性系统模型^[19],其可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = f_k(\mathbf{X}_k) + \mathbf{H}_k \xi_k \\ \mathbf{Z}_{k+1} = g_k(\mathbf{X}_k) + \boldsymbol{\eta}_k \end{cases}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{X}_k 表示系统的状态向量, \mathbf{Z}_k 表示观测向量。(7)式中 f_k 和 g_k 分别是 \mathbf{R}^n 和 \mathbf{R}^q 上的向量值函数, $1 \leq q \leq n$; \mathbf{H}_k 是 $\mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^q$ 上的矩阵值函数,对于每个 k , $f_k(\mathbf{X}_k)$ 和 $g_k(\mathbf{X}_k)$ 对 \mathbf{X}_k 所有分量的一阶偏导数都是连续的。设 $\{\xi_k\}$ 和 $\{\eta_k\}$ 为 \mathbf{R}^p 和 \mathbf{R}^q 上的零均值高斯白噪声序列,其中 $1 \leq p, q \leq n$,且对于所有的 k 和 l ,则:

$$\begin{cases} E(\xi_k \xi_l^T) = Q_k \delta_{kl}, E(\eta_k \eta_l^T) = R_k \delta_{kl} \\ E(\xi_k \eta_l^T) = 0, E(\xi_k \mathbf{X}_0^T) = 0, E(\eta_k \mathbf{X}_0^T) = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

由于 wMPS 测量模型中观测量与状态量之间呈现非线性关系,故将量测方程中的 $g_k(\mathbf{X}_k)$ 在 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 处做线性泰勒近似,则:

$$g_k(\mathbf{X}_k) \approx g_k(\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) + C_k(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \quad (9)$$

式中

$$C_k = \left[\frac{\partial g_k}{\partial \mathbf{X}_k}(\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \right], \quad (10)$$

根据文献[20]所述,最终的滤波过程称为扩展卡尔曼滤波。以 x_0 和 $\mathbf{P}_{0,0}$ 作为状态量及状态量协方差矩阵的初始值,迭代滤波算法为

$$\begin{cases}
 \mathbf{P}_{0,0} = \text{Var}(\mathbf{x}_0) \\
 \hat{\mathbf{x}}_0 = E(\mathbf{x}_0) \\
 k = 1, 2, \dots \\
 \mathbf{P}_{k,k-1} = \left[\frac{\partial f_{k-1}}{\partial \mathbf{x}_{k-1}}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \right] \mathbf{P}_{k-1,k-1} \left[\frac{\partial f_{k-1}}{\partial \mathbf{x}_{k-1}}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \right]^T + \mathbf{H}_{k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{H}_{k-1}^T(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \\
 \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f_{k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \\
 \mathbf{G}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_k^T \cdot [\mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \\
 \mathbf{P}_{k,k} = [\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \mathbf{C}_k] \mathbf{P}_{k,k-1} \\
 \hat{\mathbf{x}}_{k,k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{G}_k [v_k - g_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})]
 \end{cases} \quad (11)$$

3.3 系统建模

在 wMPS 对动态接收器进行定位过程中,以发射站激光平面的扫描角度作为观测量,记为

$$\mathbf{Z}_k = [\theta_{11k} \quad \theta_{12k} \quad \theta_{21k} \quad \theta_{22k}]^T, \quad (12)$$

状态量设为

$$\mathbf{X}_k = [x_k \quad v_{xk} \quad y_k \quad v_{yk} \quad z_k \quad v_{zk}]^T, \quad (13)$$

为验证本文算法应用于 wMPS 模型的可行性,对接收器本身的运动状态简化,假设其做匀速直线运动,则系统状态方程可以表示为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{\Gamma}_k \boldsymbol{\xi}_k, \quad (14)$$

式中 \mathbf{A}_k 表示物体系统的状态转移矩阵。假设 wMPS 的采样间隔时间为 Δt , 则 \mathbf{A}_k 可以表示为

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \quad (15)$$

在假设条件中,系统的状态方程为线性,而量测方程为非线性。故结合 3.2 节的 EKF 算法可知,需求解观测向量相对于状态向量的一阶雅克比矩阵。由于观测量与状态量无法显式表示,一阶雅克比矩阵的求取需要借助隐函数求导法则^[21],即:

$$\frac{\partial g_k}{\partial \mathbf{X}_k}(\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) = - \frac{\frac{\partial l_k}{\partial \mathbf{X}_k}}{\frac{\partial l_k}{\partial \theta_k}}(\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \quad (16)$$

结合(10)式, \mathbf{C}_k 被表示为

$$\mathbf{C}_k = - \begin{bmatrix} \frac{\partial l_{11}}{\partial x} & \frac{\partial l_{11}}{\partial v_x} & \dots & \frac{\partial l_{11}}{\partial v_z} \\ \frac{\partial l_{11}}{\partial \theta_{11}} & \frac{\partial l_{11}}{\partial \theta_{11}} & \dots & \frac{\partial l_{11}}{\partial \theta_{11}} \\ \frac{\partial l_{12}}{\partial x} & \frac{\partial l_{12}}{\partial v_x} & \dots & \frac{\partial l_{12}}{\partial v_z} \\ \frac{\partial l_{12}}{\partial \theta_{12}} & \frac{\partial l_{12}}{\partial \theta_{12}} & \dots & \frac{\partial l_{12}}{\partial \theta_{12}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial l_{21}}{\partial x} & \frac{\partial l_{21}}{\partial v_x} & \dots & \frac{\partial l_{21}}{\partial v_z} \\ \frac{\partial l_{21}}{\partial \theta_{21}} & \frac{\partial l_{21}}{\partial \theta_{21}} & \dots & \frac{\partial l_{21}}{\partial \theta_{21}} \end{bmatrix}_{4 \times 6}, \quad (17)$$

将(17)式代入 EKF 滤波(11)式中,在给定状态初值 X_0 及估计误差协方差矩阵初值 P_0 ,且分别已知状态误差及量测误差方差矩阵(R_k 、 Q_k)的前提下,通过逐步迭代得出状态向量 X_k 的最优估计值。

4 仿真实验

基于前文所述,通过仿真实验对基于 EKF 的 wMPS 动态测量方法进行仿真分析,进而验证其可行性及滤波效果。仿真所需要的外部参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Simulation parameter	Data
Intrinsic parameters 1	Laser plane 1: $[0, -0.794560, 0.607170, 0]$ Laser plane 2: $[-0.819890, 0.007920, 0.572460, -4.449510]$
Intrinsic parameters 2	Laser plane 1: $[0, 0.74568886, 0.66629432, 0]$ Laser plane 1: $[-0.7516500, -0.0093704, 0.6594956, -0.5816921]$
Extrinsic parameter	$[R, T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5000 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
Velocity/(mm/s)	$V_x = [-10, 0, 0], V_y = [0, -10, 0], V_z = [0, 0, -5]$
Process noise covariance matrix	$Q_k = \begin{bmatrix} 0.25 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 0.25 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 0.25 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$
Observation noise covariance matrix	$R_k = 10^{-11} \begin{bmatrix} 9.4 & & & \\ & 9.4 & & \\ & & 9.4 & \\ & & & 9.4 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$
Simulation points	1000

发射站内外参数的选取^[22]与此仿真实验最终结果无必然关联,因此,选择任意两个内参数不同的发射站用于仿真实验;同时假设两个发射站姿态相同,仅在 X 方向相距 5 m,如 R 、 T 矩阵所示。状态误差及量测误差的协方差矩阵根据变量测量值的统计结果确定,其中,状态变量中的动态坐标测量不确定度约 0.5 mm,速度测量不确定度约为 1 mm/s,观测量测量不确定度约为 $2''^{[11]}$,平方运算后即表 1 中所列数值。为方便观察滤波效果,在仿真过程中,接收器分别沿着 X 轴、 Y 轴以 -0.01 m/s 的速度,沿 Z 轴以 -0.005 m/s 的速度做匀速直线运动(依据发射站激光平面特性,wMPS 在 Z 方向的测量覆盖范围远小于 X 、 Y 方向,故在仿真点数相同且满足测量范围的前提下,减小仿真速度),并加入如表 1 所示的观测噪声及状态噪声,进而模拟真实轨迹。将模拟真实轨迹及基于第 3 节所述 EKF 算法得到的轨迹估计及速度估计值一同绘出,得到接收器运动的仿真曲线如图 2~4 所示。

为易于观察仿真结果,在每个方向的仿真实验中,将三维空间中的点云轨迹曲线分别向三个坐标平面投影,结合速度估计仿真结果,可以得出如下结论:

1) 仿真实验完全验证了 EKF 应用于 wMPS 动态坐标测量模型的可行性。其中,从速度估计结果看出,在给定 EKF 初值偏离真实值较大的情况下,本文算法亦可在若干个迭代周期以内收敛,逼近状态量的真实值;

2) 仿真过程中的点云坐标分量的标准差如图中所示。结果表明,接收器分别沿着 X 、 Y 及 Z 方向轨迹做匀速直线运动时,精度提升效果比较明显。

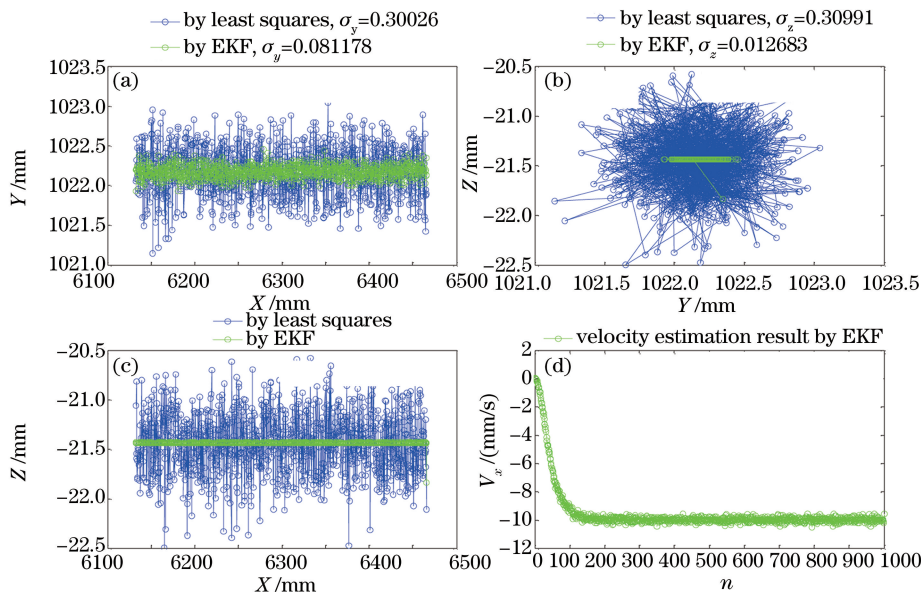


图2 沿 X 轴方向运动仿真结果图

Fig. 2 Simulation results of the movement along the X axis direction

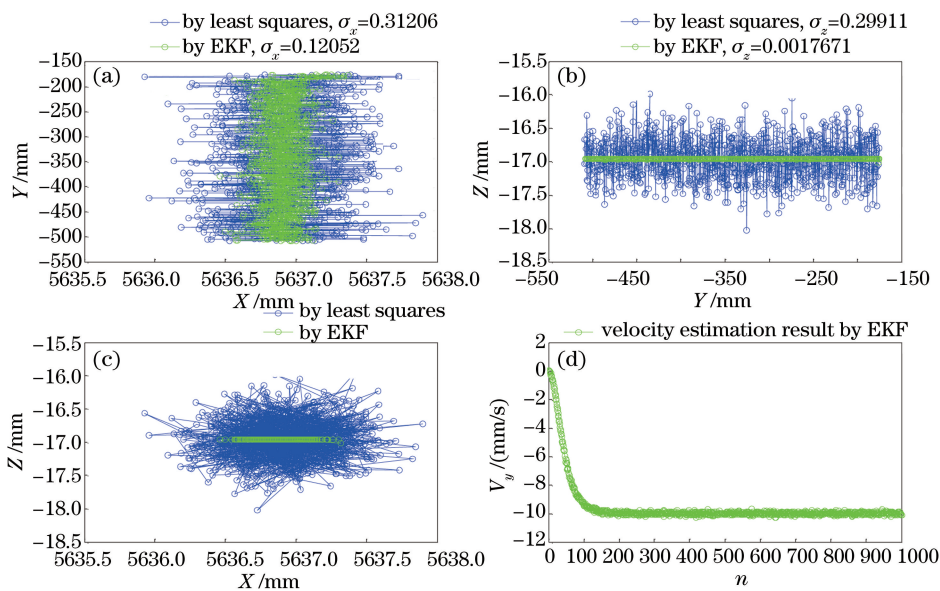


图3 沿 Y 轴方向运动仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the movement along the Y axis direction

5 实物实验

为进一步验证算法在 wMPS 真实系统上的可行性与精度,基于仿真结论,设计了实物实验。鉴于工业机器人具有准确稳定的重复定位性能,能以极高的精度逼近理想运动轨迹,结合实验室现有科研条件,选用 ABB 公司的 IRB-2400 型号工业机器人生成运动轨迹。wMPS 及实验平台如图 5 所示。

实验中,将接收器放置在机器人的末端位置,如图 5 所示。手动控制机器人,使末端接收器分别沿机器人基坐标系的 X、Y 及 Z 方向运动。机器人运动速度缓慢,除启动和停止过程外,在每一个 wMPS 测量信息更新时间内,其运动状态变化比较缓慢,用匀速模型建立状态方程误差较小^[23]。同时 wMPS 以 30 Hz 的速率连续测量接收器的空间三维坐标值,并将其转换到机器人基坐标系下。在运动过程中的各个测量更新周期,对每个观测量做 EKF。将 EKF 后的三维坐标点云与未经 EKF 的原始点云进行对比,结果如图 6~8 所示^[24]。

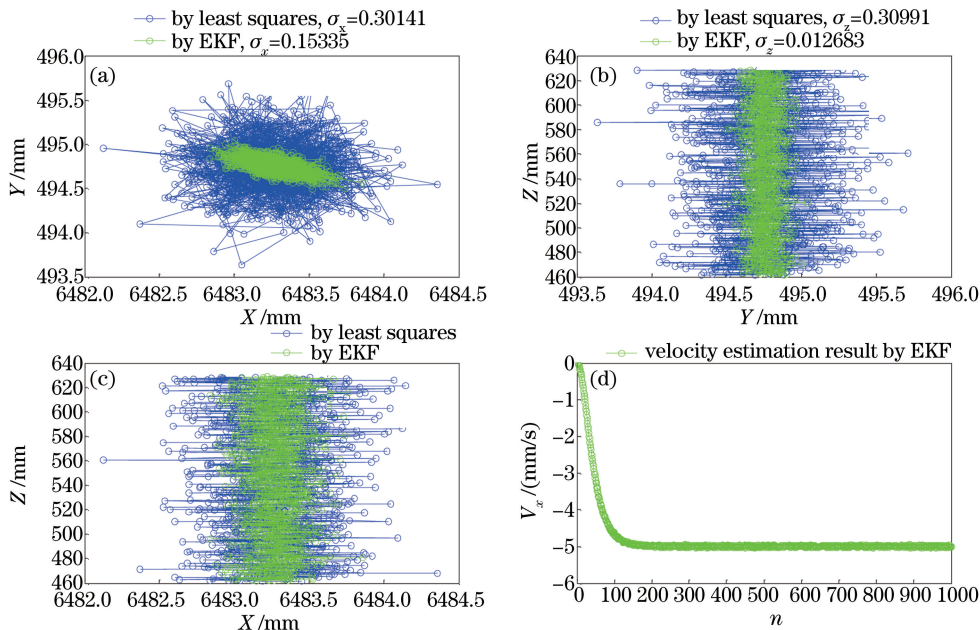


图 4 沿 Z 轴方向运动仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the movement along the Z axis direction

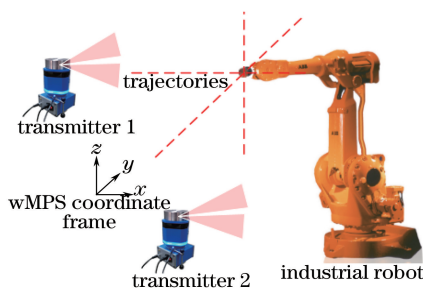


图 5 基于 wMPS 的动态测量实验平台

Fig. 5 Dynamic measurement experimental platform based on wMPS

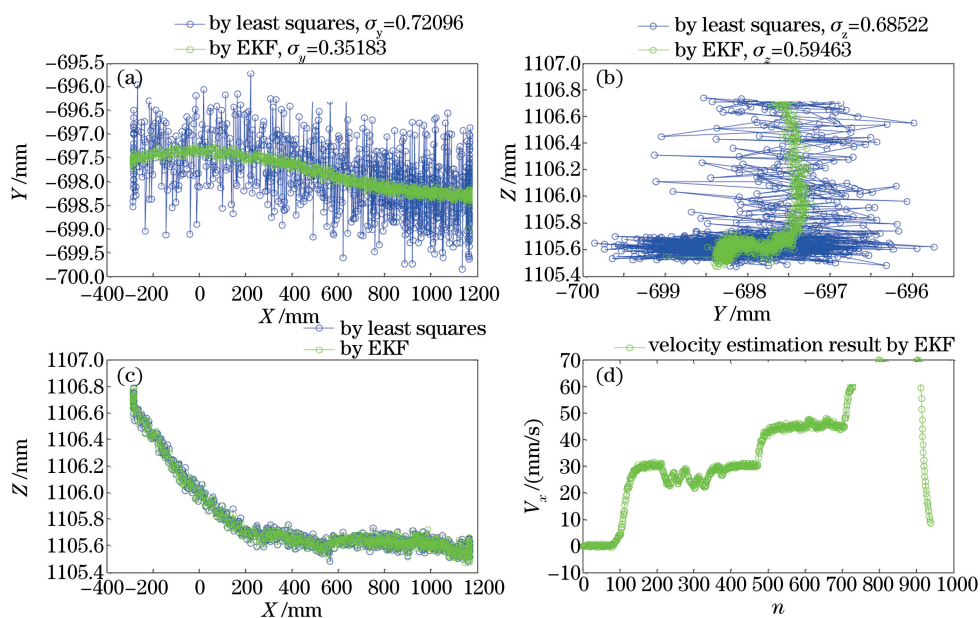


图 6 沿 X 轴方向运动实测结果

Fig. 6 Measured results of the movement along the X axis direction

从实测轨迹及 EKF 后的计算结果可以看出:在功能实现方面,该算法完全满足对 wMPS 接收器的运动状态(速度及位置)实时估计的需求。相比于传统的最小二乘算法,EKF 输出信息的维度可以任意扩展(坐标估计结果与速度估计结果同时输出);在精度方面:沿 X 轴和 Y 轴方向精度提升效果较 Z 方向更为明显。如图 6 和图 7 所示,沿 X 方向运动时,动态测量单方向的标准差可以从传统方法的 0.72 mm 提升至 0.35 mm,提升幅度约为 0.37 mm;沿 Y 方向运动时,动态测量单方向的标准差可以从传统方法的 1.21 mm 提升至 0.68 mm,提升幅度约为 0.53 mm。实验结果充分证明了对于光学动态坐标精密测量系统,此方法可以显著提高其整体测量性能。

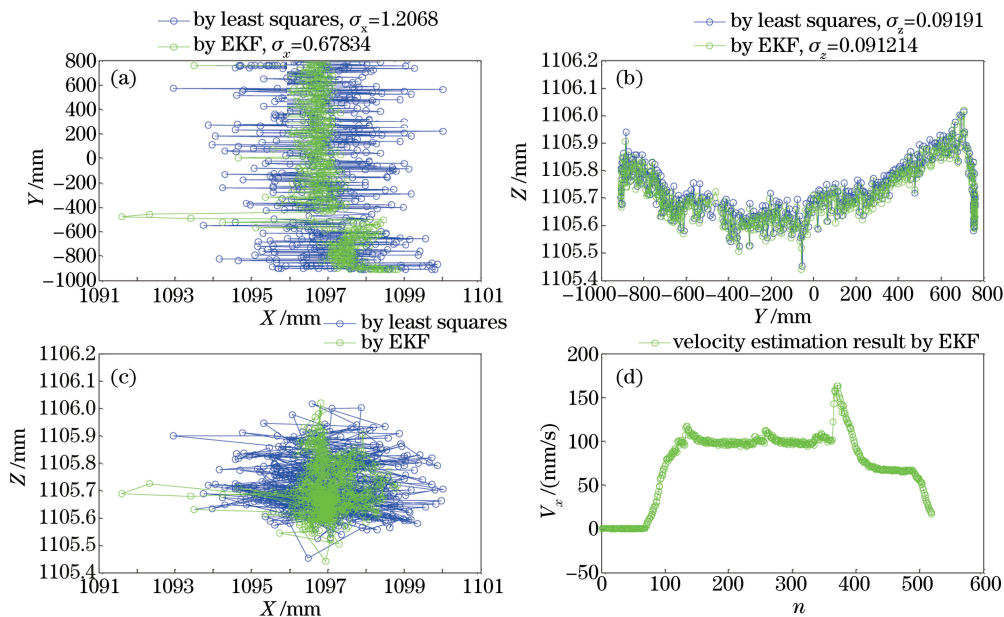


图 7 沿 Y 轴方向运动实测结果

Fig. 7 Measured results of the movement along the Y axis direction

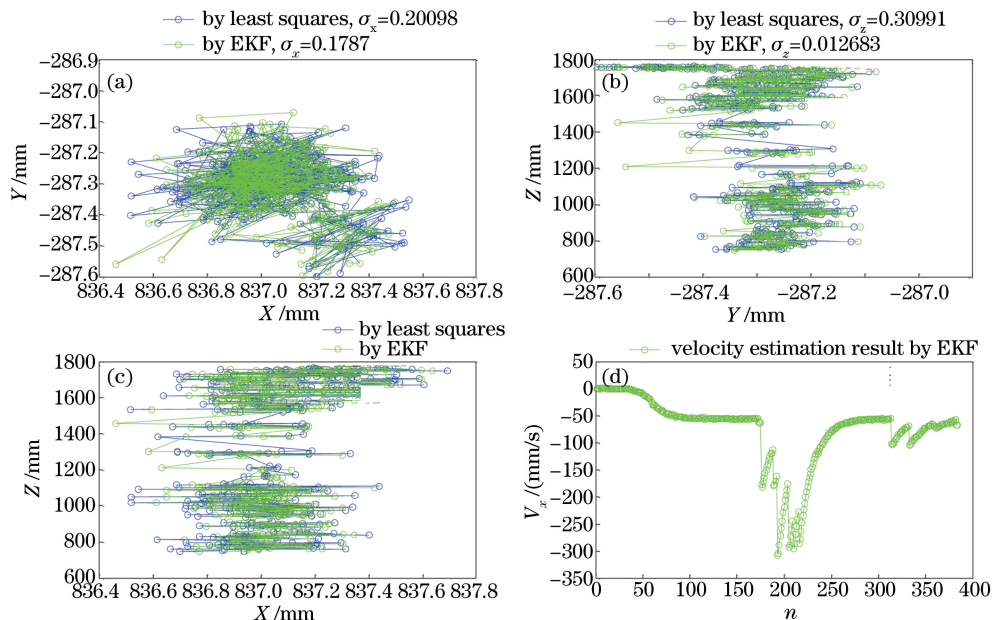


图 8 沿 Z 轴方向运动实测结果

Fig. 8 Measured results of the movement along the Z axis direction

6 结 论

基于工业现场对提升 wMPS 动态测量性能的迫切需求,结合系统的测量原理,提出了基于 EKF 的动态坐标测量算法。并模拟匀速直线运动,进行了仿真实验,进而验证了该算法的可行性及理论精度。最后,结合工业机器人,进行了实物实验,结果与仿真效果趋于一致。

在今后的工作中,有如下几方面问题需进一步研究:

1) 在实际动态测量应用中,被测点的运动轨迹及运动状态是未知的。如何对大动态、非规则运动的接收器进行状态方程的列写,有待于深入研究;

2) 算法基于测量噪声与观测噪声均为白噪声建模。然而在实际应用中,噪声多为有色噪声。如何对有色噪声进行建模与处理,需进一步研究。

参 考 文 献

- Wang Jianhua. Joining technology of final assembly for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 2: 32-35.
王建华. 飞机总装对接技术[J]. 航空制造技术, 2010, 2: 32-35.
- Ning Zhimin. Evolution summarization of the automated guided vehicles[J]. Navigation and Control, 2014, 13(5).
宁志民. AGV 技术发展综述[J]. 导航与控制, 2014, 13(5).
- Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Development of a laser-based geometric measurement system for large-scale conical [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508008.
周 森, 郭永彩, 高 潮. 基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508008.
- Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Peng Peng, *et al.*. Layout optimaization of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108006.
胡进忠, 余晓芬, 彭 鹏, 等. 基于激光多边法的坐标测量系统布局优化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108006.
- Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.*. Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011201.
- Zhao Peng, Zhang Yan, Zhang Xiaoya, *et al.*. Echo online extraction for diffuse reflection laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1028002.
赵 鹏, 张 艳, 张小亚, 等. 激光漫反射测距回波信号在线提取方法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1028002.
- Wang Z, Mastrogiacomio L, Franceschini F, *et al.*. Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(1-4): 205-213.
- Bösemann W. Advances in photogrammetric measurement solutions[J]. Computers in Industry, 2005, 56(8): 886-893.
- Ren Yongjie, Zhu Jigui, Wu jun, *et al.*. Self-calibration of workspace measurement and positioning system by using inter-scanning[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 609-616.
任永杰, 郝继贵, 吴 军, 等. 采用互扫描法自动标定工作空间定位系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 609-616.
- Xue Bin, Zhu Jigui, Yang Linghui, *et al.*. The application of the wMPS in airplane level measurement [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 22-26.
薛 彬, 郝继贵, 杨凌辉, 等. wMPS 系统在飞机水平测量中的应用[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 22-26.
- Liu Z, Zhu J, Yang L, *et al.*. A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105004.
- Xiong Z, Zhu J G, Zhao Z Y, *et al.*. Workspace measuring and positioning system based on rotating laser planes[J]. Mechanics, 2012, 18(1): 94-98.
- Li Qingying, Chu Jinkui, Li Ronghua, *et al.*. Moving object tracking algoirhth for mobile robot based on Kalman filter [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(11): 66-68.
李庆瀛, 褚金奎, 李荣华, 等. 基于卡尔曼滤波的移动机器人运动目标跟踪[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(11): 66-68.
- Cui Liuzheng, Gao Siyuan, Jia Hongguang, *et al.*. Application of neural network aided Kalman filtering to SINS/GPS [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1304-1311.
崔留争, 高思远, 贾宏光, 等. 神经网络辅助卡尔曼滤波在组合导航中的应用[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1304-

- 1311.
- 15 Duanmu Qiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui. Study on tracking algorithm for wMPS based on least square-Kalman filter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(2): 236-239.
端木琼, 杨学友, 郝继贵. 基于小二乘-卡尔曼滤波的 wMPS 系统跟踪定位算法研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2): 236-239.
- 16 Duanmu Qiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui, *et al.*. Study on location algorithm for network optical scan-based large-scale measuring system[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(9): 1290-1295.
端木琼, 杨学友, 郝继贵, 等. 基于光电扫描的网络式大尺寸测量系统定位算法研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(9): 1290-1295.
- 17 Yang Linghui. Research on large-scale space coordinate measurement location technology based on optical scanning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 21-30.
杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 21-30.
- 18 Duanmu Qiong. Research on hardware platform optimization and key technologies of dynamic metrology for wMPS[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 58-60.
端木琼. wMPS 系统的硬件平台优化及动态坐标测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 58-60.
- 19 Song Wenyao. Kalman filter[M]. Beijing: Science Press, 1991: 182-190.
宋文尧. 卡尔曼滤波[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 182-190.
- 20 Bell B M, Chui C K, Chen G. Kalman filtering with real-time applications[J]. Journal Storage, 2010.
- 21 Smirnov V. A course of higher mathematics[J]. Mathematical Gazette, 1964, 50: 372.
- 22 Zhao Z, Zhu J, Lin J, *et al.*. Transmitter parameter calibration of the workspace measurement and positioning system by using precise three-dimensional coordinate control network[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 084108.
- 23 Zhou Jinnan, Wu Zhanjun, Fan Zhe, *et al.*. Research on Kalman filter algorithm for vehicle laser doppler velocimeter[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1102006.
周金男, 邬战军, 范哲, 等. 车载激光多普勒测速仪的卡尔曼滤波算法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102006.
- 24 Guo Yin, Liu Changjie, Zhu Jigui, *et al.*. Measurement system for dynamic envelope curve of high-speed train[J]. Chinese J Lasers, 2014, 40(2): 0208002.
郭寅, 刘常杰, 郝继贵, 等. 高速列车动态包络线测量系统[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0208002.