

基于改进 Hatch 滤波的 BDS 多基准一致性检测

吕浩源¹, 张辉¹, 庞春雷¹, 曹海霞¹, 王祝欣²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 中国人民解放军 93115 部队, 沈阳 110015)

摘要: 多路径效应对伪距测量的影响一直是制约卫星系统完好性监测的重要因素, 相位平滑伪距算法可以有效抑制多路径对伪距测量的影响。针对北斗卫星系统伪距测量易受多路径影响的特点, 提出一种改进的 Hatch 滤波算法。基于输出方差最小原则, 建立起滤波器参数 θ 与输出伪距方差的关系表达式, 通过对方差表达式求导, 选取了新的滤波器参数。实验证明, 改进的 Hatch 滤波提高了伪距测量精度, 减小了 B 值的偏差和波动范围, 提高了北斗卫星系统多基准一致性检测的能力。

关键词: 卫星导航; 完好性; 改进 Hatch 滤波; 多基准一致性检测

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)06-0023-05

Multi-reference Consistency Check for BDS Based on Improved Hatch Filter

LYU Hao-yuan¹, ZHANG Hui¹, PANG Chun-lei¹, CAO Hai-xia¹, WANG Zhu-xin²

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. No. 93115 Unit of PLA, Shenyang 110015, China)

Abstract: The influence of multipath effect on pseudo-range measurement is always an important constraint for integrity monitoring of satellite system, and carrier phase smoothing code pseudo-range method can restrain the influence effectively. Considering that the pseudo-range measurement of BeiDou System (BDS) is easily affected by the multipath effect, we proposed an improved Hatch filter to solve the problem. The relational expression of the filter parameter θ with pseudo-range variance was established, and the new filter parameter was selected based on principle of minimum variance. The results show that the new method can improve the precision of pseudo-range measurement, and decrease the bias and fluctuation range of B-value. This method can improve the capability of multi-reference consistency check.

Key words: satellite navigation; integrity; improved Hatch filter; multi-reference consistency check

0 引言

随着卫星导航技术的迅速发展, 对其完好性进行监测变得越来越重要。作为差分局域增强完好性监测的核心算法, 多基准一致性检测一直是研究的热点。多基准一致性检测算法用于检测地面基准站产生的差分伪距修正值的一致性, 算法通过定义 B 值来判断播发差分数据的可用性。低精度的伪距测量值将导致系统产生误警, 降低系统的可用性和连续性, 所以伪距测量的精度将对卫星系统完好性监测产生重要影响。

现有多基准一致性检测算法^[1-3]大多通过改进算法来提高卫星导航系统完好性监测水平。文献[1]给出了 B 值的含义, 并通过实验针对不同卫星仰角限定了 B 值的范围和告警门限; 文献[2]针对 B 值之间的相关性影响, 提出行列判断法和 C 值辅助法, 有效降低了 B 值之间的相关性干扰并区分了故障类型; 文献[3-4]针对伪距残差的非零均值、非高斯分布的特点提出新的膨胀算法, 提高了空间信号的可用性; 针对电离层对伪距测量的影响, 文献[5-6]也进行了相关研究。但上述研究都是基于数据后处理开展的, 而对于如何提高前端测量伪距质量^[7]开展的研究较少, 此外, 以上研究均没有针对伪距测量中的多路径影响提出相应的解决办法。

针对北斗卫星导航系统伪距受多路径影响幅度

收稿日期: 2016-06-15 修回日期: 2016-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61273049)

作者简介: 吕浩源(1991—), 男, 吉林通化人, 硕士, 研究方向为卫星导航系统完好性监测及精密进近着陆。

大^[8-9],且低频部分比重大的特点,本文将开展针对北斗卫星导航系统的多基准一致性检测。Hatch 滤波算法可以有效抑制多路径影响^[10],提高伪距测量值精度,但系统误差随着时间累积,将给系统求得 B 值造成一定偏差。通过改进现有的 Hatch 滤波算法^[11-12]有效提高伪距测量的精度,保证参与一致性检验数据的正确性,从而得到更加准确的 B 值,提高系统完好性监测水平。

1 传统多基准一致性检测算法

基于 B 值的多基准一致性检测算法,主要分为 B 值计算和 B 值告警门限生成两步,比较得到的 B 值与告警门限,判断得到的差分伪距修正值是否存在异常,从而确保播发的伪距修正信息不含有危害飞行器精密近近的误导信息。通过对伪距修正值的有效监测,确保播发数据的正确性,提高卫星导航精密近近着陆的安全性。

1.1 B 值的计算

B 值是通过计算不同接收机生成的伪距修正量来实现的,主要分为载波平滑伪距、差分修正、多接收机修正量平均处理和 B 值生成等步骤。

1) 使用载波相位观测量平滑码观测量。为有效减少伪距观测量中的偶然误差,将采用 Hatch 滤波算法平滑伪距,算式为

$$\rho_{s,m,n}(k) = \frac{N-1}{N} [\rho_{s,m,n}(k-1) + \varphi_{m,n}(k) - \varphi_{m,n}(k-1)] + \frac{1}{N} \rho_{m,n}(k) \quad (1)$$

式中: $N = \tau/T$, τ 为平滑滤波的时间常数,通常取 100 s, T 为原始观测量的采样间隔,通常为 1 s; $\rho_{m,n}(k)$ 和 $\varphi_{m,n}(k)$ 分别为 k 时刻接收机 m 对卫星 n 的码和载波相位观测量; $\rho_{s,m,n}(k)$ 为 k 时刻接收机 m 对卫星 n 的平滑伪距。假设滤波中卫星是被接收机连续跟踪的,如果接收机失锁,滤波器需要被重置。

2) 差分伪距修正值的计算。将平滑的码伪距与真实距离差分,计算平滑后的差分伪距修正量为

$$\rho_{sc,m,n}(k) = \rho_{s,m,n}(k) - R_{m,n}(k) - \tau_{m,n}(k) \quad (2)$$

式中: $\rho_{s,m,n}(k)$ 为经载波相位平滑后的码伪距; $R_{m,n}(k)$ 是卫星与接收机之间的真实距离,可以通过标定的基准接收机位置与卫星位置计算得到 $R_{m,n}(k) = \sqrt{(x_N - x_i)^2 + (y_N - y_i)^2 + (z_N - z_i)^2}$; $\tau_{m,n}(k)$ 为接收机的钟差估计^[13],可由伪距与真实距离做差平均得到

$\tau_{m,n}(k) = \frac{1}{N_c} \sum_{i \in s} (\rho_{s,m,n}(k) - R_{m,n}(k))$, 其中, N_c 为接收机可见卫星数。

3) 多接收机修正值平均处理及 B 值生成。

$$\rho_{sc,i,n}(k) = \rho_{s,m,n}(k) - R_{m,n} - \frac{1}{N_c} \sum_{i \in s} (\rho_{s,m,n}(k) - R_{m,n}) \quad (3)$$

$$\rho_{corr,n}(k) = \frac{1}{M_n(k)} \sum_{j \in s} \rho_{sc,i,n}(k) \quad (4)$$

$$B_{m,n}(i,j) = \rho_{corr,n}(k) - \frac{1}{M_n(k) - 1} \sum_{i \in s, i \neq j} \rho_{sc,i,n}(k) \quad (5)$$

式中: $M_n(k)$ 为参考接收机个数; $B_{m,n}(i,j)$ 为 k 时刻接收机 m 的 B 值,无故障时 B 值将会在 0 值附近小幅度波动。

由式(5)可得伪距修正量 $\rho_{sc,i,n}(k)$ 将会直接影响 B 值大小和波动范围:当伪距修正值 $\rho_{sc,i,n}(k)$ 中存在系统偏差时,得到的 B 值较 0 值会存在一定的偏差;伪距修正值 $\rho_{sc,i,n}(k)$ 中存在随机误差将会给 B 值带来不确定的随机波动。这些都将影响 B 值对系统评估的准确性,为了提高伪距修正值 $\rho_{sc,i,n}(k)$ 的准确性,必须提高伪距测量精度。平滑滤波可以提高伪距测量精度,从而提高 B 值计算的准确性。

1.2 B 值的告警门限的计算

为了实现系统的完好性监测,必须给 B 值设定一个告警门限,当 B 值超过该告警门限时,说明此时的差分伪距修正量存在不一致,若不及时告警而将此时的危险误导信息播发给机载用户将给航行带来危险。选择适当的告警门限是提高完好性监测水平的必要条件,告警门限过高将会出现漏警,影响着陆系统的安全性;告警门限设定过低将会出现误警,降低系统的可用性。为得到更加准确的告警门限,一般通过大量的统计数据得到反映 B 值分布情况的概率密度函数,根据完好性限定的漏警概率求得告警阈值,当故障告警概率小于 $P_r(|x - \mu_{elev}| > 6f\sigma_{elev}) = 2Q(6) = 1.9732 \times 10^{-9}$ 时,可以满足 CAT I 精密近近着陆导航的要求。通过以下步骤可求得 B 值告警门限:

- 1) 分区间统计分析,求取每个区间样本的平均值 μ_{elev} 和方差 σ_{elev} ;
- 2) 样本分区间归一化处理;
- 3) 归一化偏离度分布统计,得到离散概率密度函数;
- 4) 对标准正态分布的方差轨迹进行高斯膨胀直到离散的概率密度函数完全被包络,得到膨胀系数 f ;
- 5) B 值告警门限的生成,算式为

$$T_{elev} = \mu_{elev} \pm 6f\sigma_{elev} \quad (6)$$

2 改进的 Hatch 滤波模型

通过分析 B 值的计算过程可知,伪距测量精度直接影响 B 值的大小和分布。由式(5)可知,伪距测量值中存在较大的随机误差将增大 B 值的波动范围;当伪距测量值中存在较大的系统误差时将会导致 B 值较 0 值产生一定的偏移,它们都会影响 B 值告警门限的

确定,降低完好性监测水平。

传统的 Hatch 滤波虽然可以大大减弱伪距测量值的随机误差,但不能有效地改善系统误差^[7],并且随着误差的叠加可能造成伪距测量精度下降的问题。根据式(1),考虑到 $\rho_{s,m,n}(1) = \rho_{m,n}(1)$ 得到

$$\rho_{s,m,n}(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_{m,n}^j(k) + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\varphi_{m,n}^n(k) - \varphi_{m,n}^j(k)) \quad (7)$$

式(7)说明 Hatch 滤波利用算术平均运算剔除了伪距低频分量,而相位的高频成分基于时间差分算子实现,较好地抑制了低频分量。设伪距误差的标准差为 σ_ρ^2 ,相位误差的标准差为 σ_φ^2 ,假设伪距误差与相位误差不相关,根据误差传播定律可得平滑后的伪距方差为 $\sigma_\rho^2 = \frac{1}{n} \sigma_\rho^2 + \frac{1}{n} \sigma_\varphi^2$,由于 $\sigma_\rho^2 \gg \sigma_\varphi^2$,所以 $\sigma_\rho = \sqrt{1/n} \sigma_\rho$,相位平滑伪距精度比单纯伪距精度提高了 \sqrt{n} 倍,多路径影响得到了有效抑制。

Hatch 滤波算法利用相位和码伪距的不变组合 $\lambda_i \hat{N}_i = \rho_i - \varphi_i$,其中, λ_i 为载波 φ_i 的波长, \hat{N}_i 为模糊度参数。假定对某颗 BDS 卫星连续观测了 n 个历元,则可求出不变参数的算术平均值为

$$\lambda_i \bar{N}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\rho_i - \varphi_i) = \frac{n-1}{n} \lambda_{i-1} \bar{N}_{i-1} + \frac{1}{n} (\rho_{m,n}(k) - \varphi_{m,n}(k)) \quad (8)$$

根据式(8)可得

$$\rho_{s,m,n}(k) = \varphi_{m,n}(k) - \lambda_i \bar{N}_i = \frac{n-1}{n} (\varphi_{m,n}(k) - \lambda_{i-1} \bar{N}_{i-1}) + \frac{1}{n} \rho_{m,n}(k) \quad (9)$$

在保证无偏性的同时,基于式(9)设计一种可以输出更小方差的改进 Hatch 滤波方法,即

$$\rho_{s,m,n}(\theta) = (1-\theta) \rho_{s,m}^n + \theta (\varphi_{m,n}(k-1) - \lambda_{i-1} \bar{N}_{i-1}) \quad (10)$$

式中, θ 为任意实数,假设同类观测量是等精度的。 γ 表示码伪距与相位的权比,以 $\sigma_{s,m,n}^2$ 表示组合观测量 $\rho_{s,m,n}(k)$ 的方差,则式(10)给出的滤波器的输出方差为

$$\text{cov}[\rho_{s,m,n}(\theta)] = \frac{n-1}{n} \sigma_{s,m,n}^2 [(1+\gamma)\theta^2 - 2\theta + \frac{n}{n-1}] \quad (11)$$

当变量 $\theta = (1+\gamma)^{-1}$ 时,式(11)取得最小值,此时,对应的滤波算法输出结果最优,满足输出最小方差。将 $\theta = (1+\gamma)^{-1}$ 代入式(10)得到改进的 Hatch 滤波模型为

$$\rho_{s,m,n}(\theta^*) = \frac{1}{\gamma+1} [\rho_{s,m}^n + \varphi_{m,n}(k-1) - \lambda_{i-1} N_{i-1}] \quad (12)$$

改进后的 Hatch 滤波输出方差为

$$\text{cov}[\rho_{s,m,n}(\theta^*)] = \frac{n-1}{n} \sigma_{s,m,n}^2 \left[\frac{\gamma}{1+\gamma} + \frac{1}{n-1} \right] \quad (13)$$

而未改进的输出方差为

$$\text{cov}[\rho_{s,m,n}(k)] = \frac{n-1}{n} \sigma_{s,m,n}^2 \left[\gamma + \frac{1}{n-1} \right] \quad (14)$$

式(13),式(14)表明,改进算法输出的平滑伪距结果优于原方法,改进算法精度增益可用方差比 $\text{cov}[\rho_{s,m,n}^n(k)] / \text{cov}[\rho_{s,m,n}(\theta^*)]$ 来衡量,得到其与平滑历元数 n 及 γ 之间的关系,如图1所示。

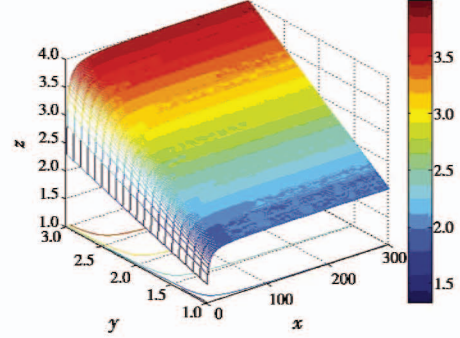


图1 改进 Hatch 滤波算法的精度增益

Fig. 1 Accuracy increment of the improved Hatch filter

图中: x 轴代表平滑历元数; y 轴表示码伪距与相位观测量的权比; z 轴表示改进算法的精度增益。通过观察图1可以发现,改进 Hatch 滤波算法的精度增益大于1,说明改进方法输出伪距方差较小。新滤波算法的增益精度随着码伪距与观测量的权比增大而变大,此外还发现,当平滑历元超过100时,增益精度变化幅度逐渐变小。改进算法精度增益恒大于1,证明了改进 Hatch 滤波算法提高伪距精度的可行性。

3 实验结果分析

实验采用4台双模GPS/BDS接收机,并且将其分别放于边长100 m的正方形的4个顶点接收卫星信号,卫星可视状况良好。为验证算法的有效性,分别选取不同接收机同一时段不同频点上的卫星数据进行试验,并分别开展改进算法B1,B2频点的对照实验。选取卫星数据的时长为1800 s,采样间隔为1 s。

实验1为原算法与改进算法B1频点的对照实验。未改进 Hatch 滤波算法求得北斗系统B1频点伪距生成的B值如图2所示,由图可知,不同接收机B1频点上得到的B值不在0值附近波动,数据的分布较0值有较大的偏差。图3为改进 Hatch 滤波后北斗系统B1频点伪距生成的B值,通过与图2对比发现,改进后的 Hatch 滤波算法有效地减小了各接收机B值的偏差,但由于北斗卫星系统B1频点自身测距精度较低,改进算法后得到的B值无法满足在0值附近波动的分布要求。通过对比可知,改进 Hatch 滤波算法有效地减小了各接收机的B值,降低了系统偏差影响。改进的 Hatch 滤波算法使4台接收机在B1频点上B值平均减小了1.71 m,对于1号接收机改善效果最明显,B值平均减小了2.31 m。

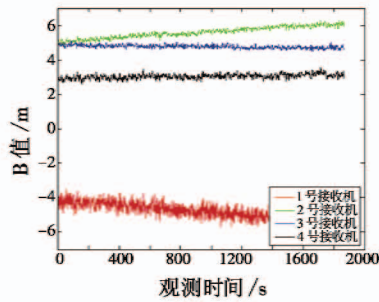


图2 B1频点伪距生成的B值

Fig. 2 B-value generated under B1 frequency point

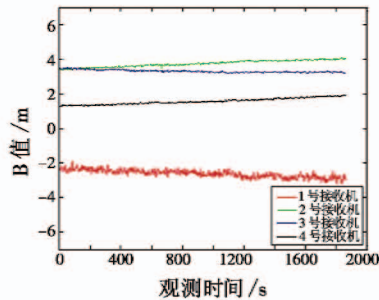


图3 改进 Hatch 算法 B1 频点伪距生成的 B 值

Fig. 3 B-value generated by improved Hatch filter under B1 frequency point

实验2为原算法与改进算法B2频点的对照实验。图4为未改进Hatch滤波算法B2频点计算得到的伪距所求得的B值,由图可知,B值在0值附近波动,并且在卫星无故障时波动较小,可以满足卫星系统的完好性监测要求,但图中不同接收机得到的B值较0值还是存在一定的偏差,将会导致系统出现误警的完好性风险增加。由图5可知,改进Hatch滤波算法求得B2频点伪距生成的B值比图4中相应的B值均有减小;改进Hatch滤波算法在减小B值偏差的同时有效地减小了B值的波动范围,说明改进Hatch滤波算法可以消除随机误差。

此外,通过对比图2与图4发现,图4中各接收机B值较0值偏差较小,由于B2频点测得伪距精度比B1频点高,可有效提高B值质量,证明了高精度的伪距测量数据能够辅助得到更加适合完好性监测的B值。

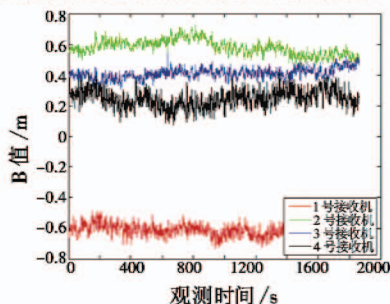


图4 B2频点伪距生成的B值

Fig. 4 B-value generated under B2 frequency point

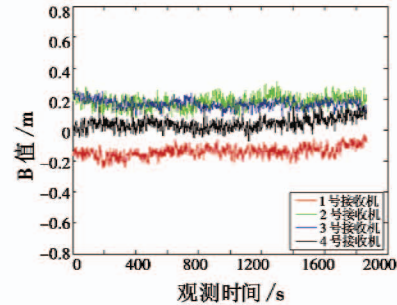


图5 改进 Hatch 算法 B2 频点伪距生成的 B 值

Fig. 5 B-value generated by improved Hatch filter under B2 frequency point

综上所述,改进Hatch滤波算法可以抑制多路径影响,有效地降低B值的偏差,并且还可以减小B值的波动范围,改进算法求得B值的一致性好,可有效提高多基准一致性检测能力。实验结果证明了基于改进Hatch滤波算法提高BDS系统多基准一致性检测能力的可行性,通过改进平滑滤波算法可以有效地提高B值质量以及完好性监测水平。原算法与改进算法B1和B2频点的实验结果如表1所示。

表1 改进算法与原算法B值对比表

Table 1 The B-values of the improved method and traditional method

接收机序号	B1 频点				B2 频点			
	1	2	3	4	1	2	3	4
原算法 B 值均值/m	-4.86	5.53	4.79	2.88	-0.59	0.55	0.41	0.34
改进算法 B 值均值/m	-2.55	3.72	3.34	1.60	-0.15	0.22	0.19	0.05
原算法 B 值波动范围/m	2.65	1.50	0.59	0.99	0.26	0.27	0.25	0.34
改进算法 B 值波动范围/m	1.34	0.72	0.35	0.68	0.22	0.21	0.17	0.16

4 结论

多基准一致性检测是差分局域增强系统完好性监测的核心算法,差分伪距修正值对于保障精密近着陆具有重要作用。通过改进Hatch滤波算法可提高伪距测量精度,减小北斗系统多路径对伪距测量的影响,从而提高被监测数据的质量和系统完好性。实验证明,改进Hatch滤波算法能够降低B值偏差,减小B值波动范围,提高B值的一致性,降低因伪距测量误差而引起的误警。建议采用改进Hatch滤波B2频点测定的伪距数据,进行卫星系统的多基准一致性检测。

参考文献

- [1] 杨文辉,周保军. LAAS地面系统中的多基准一致性检测算法的分析[J]. 电子学报,2006,34(3):469-471.

- [2] 王志鹏,张军,刘强. LAAS 地面站伪距纠正量误差完好性监测算法研究[J]. 电子与信息学报,2009,31(1):196-200.
- [3] 李亮,赵琳,丁继成,等. 提高 LAAS 空间信号可用性的完好性监测新膨胀算法[J]. 航空学报,2011,32(4):664-671.
- [4] XUE R, WANG Z L. A novel LAAS pseudo-range error over-bound method based on improved pseudo-range error distribution model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(3):638-645.
- [5] 牛飞,马刘海,刘芹丽,等. 电离层异常状态下的自适应平滑滤波算法及性能分析[J]. 测绘科学技术学报,2015,32(4):331-335.
- [6] ZHAO L, LI L, SUN M, et al. Novel adaptive Hatch filter to mitigate the effects of ionosphere and multipath on LAAS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(6):1046-1053.
- [7] 徐轲,赵修斌,庞春雷,等. 卫星着陆系统差分基准站 B 值分析与处理算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):50-53.
- [8] WU X L, ZHOU J H, WANG G, et al. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7):1297-1306.
- [9] 常志巧,胡小工,郭睿,等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2015,45(7):079508-1-079508-9.
- [10] 徐君毅,李金龙,何海波,等. 基于观测值加权相位平滑伪距的北斗伪距差分定位[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(4):123-126.
- [11] 赵琳,武晓雯,李亮,等. 基于 Hatch 滤波法的 GPS 伪距差分定位分析[J]. 遥测遥控,2011,32(6):58-62.
- [12] 孙正明,高井祥,王坚. GPS 双频相位平滑伪距权重因子的探讨[J]. 海洋测绘,2007,27(4):13-16.
- [13] 陈金平. GPS 完善性增强研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2001.

(上接第 12 页)

准和运动历史图像的检测框架来完成运动目标检测。针对运动检测容易出现虚警的情况,提出了多帧碰撞检测算法来检验所有待定的运动前景,降低虚警。通过多组测试序列的验证和数据统计分析,本文提出的运动检测算法保持了较高的查全率以及极高的检测精度和极低的虚警率,取得了很好的实验效果,在军事目标的监控和跟踪以及安防领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] GOSHTASBY A A, NIKOLOV S. Image fusion: advances in the state of the art[J]. Information Fusion, 2007, 8(2):114-118.
- [2] 潘翔鹤. 基于 DM642 的智能视频监控系统的研究与开发[D]. 上海:东华大学,2009.
- [3] NERI A, COLONNESE S, RUSSO G, et al. Automatic moving object and background separation[J]. Signal Processing, 1998, 66(2):219-232.
- [4] RIDDER C, MUNKELT O, KIRCHNER H. Adaptive background estimation and foreground detection using Kalman-filtering[C]//Proceedings of International Conference on Recent Advances in Mechatronics, 1995:193-199.
- [5] FRIEDMAN N, RUSSELL S. Image segmentation in video sequences: a probabilistic approach[C]//Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 1997:175-181.
- [6] 聂炬,陈怀民. 一种鲁棒的背景配准方法[J]. 计算机工程与应用,2010(6):194-196.
- [7] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [8] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. SURF: speeded up robust features[C]//The 9th European Conference on Computer Vision, 2006:404-417.
- [9] BRADSKI G R, DAVIS J W. Motion segmentation and pose recognition with motion history gradients[J]. Machine Vision and Applications, 2002, 13(3):174-184.
- [10] 王亮芬,周东翔,梁华,等. 动摄像机下基于 SIFT 特征匹配和 MHI 的目标检测[J]. 计算机工程与科学,2010(1):67-70.
- [11] GJK-distance & closest points[Z]. In Game Development, 2010.
- [12] ERICSON C. Real-time collision detection[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [13] COLLINS R, ZHOU X H, TEH S K. An open source tracking testbed and evaluation web site[C]//IEEE International Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance, 2005:11-18.
- [14] GOYETTE N, JODOIN P M, PORIKLI F, et al. Change-detection. net: a new change detection benchmark dataset[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2012. doi: 10.1109/CVPRW.2012.6238919.