

文章编号 1004-924X(2009)12-3069-08

十字交叉六边形块运动的估计搜索

祝世平, 申晓东

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 测控与信息技术系, 北京 100191)

摘要:在快速块匹配运动估计中,搜索模式对搜索速度和搜索质量有很大的影响。本文基于现实视频序列中运动向量的分布特征,提出了一种十字交叉六边形搜索算法(NHEXS)。首先用小十字模式进行预搜索,找到最小块匹配失真点(MBD);以MBD为中心构造大十字搜索模式,找到MBD;然后以大十字模式的MBD为中心,开始六边形搜索。首先以搜索大六边形方式搜索,如果MBD在中心,则以小六边形方式搜索,找到的MBD点即为最终的块匹配失真点;否则继续大六边形搜索。十字交叉六边形搜索算法还采用了中途停止技术,对静止和半静止块的搜索速度有显著的提高。改进的部分块失真准则在不影响失真度的情况下降低了计算复杂度。实验结果表明,十字交叉六边形搜索算法比六边形搜索算法和新型十字菱形搜索算法在信噪比降低很少甚至不降低的情况下,分别节省32%和16%的搜索点,与其它流行的块匹配运动估计算法相比,本文算法有更快的搜索速度和更小的失真度。

关键词:运动估计;块匹配;十字交叉六边形搜索;部分块失真准则

中图分类号:TN941.1;TN919.81 **文献标识码:**A

Cross-hexagon search algorithm for fast block-matching motion estimation

ZHU Shi-ping, SHEN Xiao-dong

(*Department of Measurement Control and Information Technology, School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

Abstract: In a fast block-matching motion estimation, search patterns have a large impact on searching speed and searching quality. Based on the motion vector distribution characteristics of real video sequences, a new cross-hexagon search algorithm (NHEXS) is proposed. Firstly, a pre-search is performed by using the small cross search pattern to find the Minimum Block Distortion (MBD) point. Then, the MBD point found in the first step is used as the center to construct the big cross search pattern to find the new MBD point. Finally, the MBD point found in the second step is used as the center to construct a hexagon search pattern. In the hexagon search, the big hexagon is searched firstly. If the MBD point is at the center, the small hexagon is searched and the MBD point to be found is the final motion vector. Otherwise, the big hexagon is searched continually. The NHEXS employs a halfway stop technique to significantly improve the search speed for stationary and quasi-stationary blocks, and the Modified Partial Distortion Criterion (MPDC) in the NHEXS reduces the computational complexity in the similar distortion. Experi-

收稿日期:2009-01-19;修订日期:2009-03-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60675018);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

mental results indicate that by the same PSNR, the NHEXS has reduced the search points by 32% and 16%, respectively, as compared with the Hexagon Search (HEXS) and New Cross Diamond Search (NCDS). Moreover, the NHEXS shows a faster searching speed and smaller distortion than other popular fast block-matching motion estimation algorithms.

Key words: motion estimation; block-matching; cross-hexagon search; partial distortion criterion

1 引言

运动估计是视频压缩中的关键技术,在一个视频压缩方案中运动估计通常约占总计算量的 60%~80%,因此,寻找高效、快速的运动估计算法至关重要^[1]。块匹配(BMA)算法因其简单、实用的特点得到广泛的应用。在 BMA 中,全搜索算法(FS)精度最高,但其巨大的计算复杂度使其不适宜应用,因而出现了很多快速搜索算法:如早期的三步法(TSS)和二维对数法(2DLOG)通过限制搜索位置的数目来减小计算复杂度,但不利于估计小的运动且搜索容易陷入局部最小。新三步法^[2]、四步法^[3]、梯度下降法^[4]、菱形搜索法^[5]、十字菱形搜索法^[6]、新十字菱形搜索法^[7]、六边形搜索法^[8]等利用运动矢量(MV)具有中心偏移的分布特性以提高匹配速度,但搜索速度仍然有待优化和提高。

本文根据在现实视频序列中,运动矢量在搜索窗口($W = \pm 7$)中心点的水平和垂直方向上 9 个候选点有很高分布可能的特点^[9],在六边形搜索(HEXS)之前,用十字模式先搜索这 9 个点,并采用中途停止技术^[6],使得小的运动矢量用更少的点就能搜索到。该算法针对 BMA 中由于使用块的全部像素来计算失真度而大大增加了计算复杂度的问题^[10],采用了改进的部分失真准则(MPDC)^[11],只使用块其中的一部分像素就可以对失真度有较好的度量,大大降低了计算复杂度。

2 本文算法

2.1 基于十字中心的运动矢量分布

从不同视频序列的向量分布特征表 1 可以发现:运动矢量具有中心偏移的特性。

表 1 搜索窗口中各个搜索像素点运动矢量分布概率表
Tab.1 Motion vector distributions probabilities (%) of all points within search window

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 45.44 | 7.94 | 1.30 | 0.76 | 0.46 | 0.18 | 0.70 | 0.26 |
| 1 | 15.71 | 2.76 | 1.41 | 0.43 | 0.20 | 0.10 | 0.07 | 0.12 |
| 2 | 4.37 | 2.04 | 0.84 | 0.22 | 0.14 | 0.05 | 0.10 | 0.07 |
| 3 | 3.75 | 1.37 | 0.92 | 0.34 | 0.12 | 0.19 | 0.10 | 0.19 |
| 4 | 0.86 | 0.90 | 0.30 | 0.16 | 0.13 | 0.06 | 0.17 | 0.08 |
| 5 | 0.68 | 0.75 | 0.11 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 6 | 0.40 | 0.30 | 0.11 | 0.07 | 0.16 | 0.05 | 0.09 | 0.06 |
| 7 | 0.71 | 0.18 | 0.21 | 0.17 | 0.12 | 0.17 | 0.08 | 0.23 |

从图 1 可以看出,大约 81.80%的运动矢量分布在搜索窗口中心 5×5 ($r=2$) 的区域。其中,十字模式的矢量在这一区域的分布最多:74.71%的运动矢量分布在大十字模式中($A+B+C$),71.76%的运动矢量分布在搜索窗口中心 2×2 ($r=1$)($A+B+D$)的区域,68.98%的运动矢量分布在搜索窗口的小十字模式($A+B$)中。

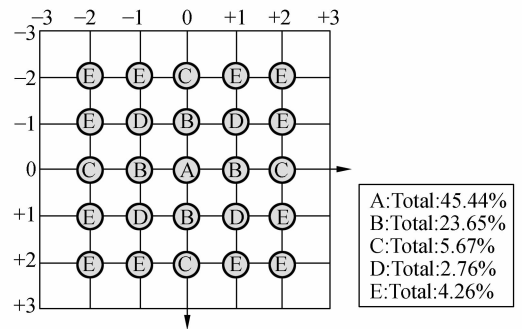
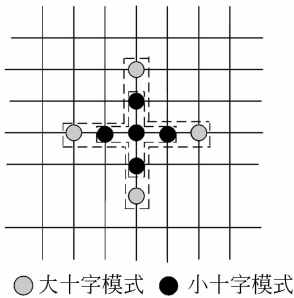


图 1 中心 3 pixel \times 3 pixel 区域的运动矢量分布概率
Fig.1 Motion vector distributions probabilities within 3 pixel \times 3 pixel area

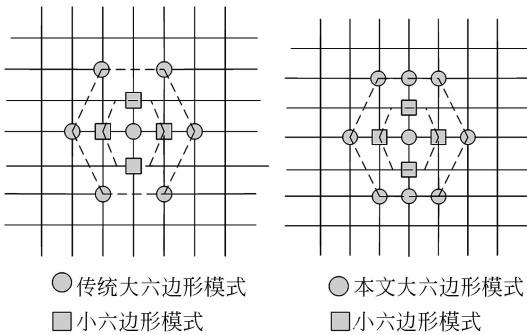
根据运动矢量在搜索窗口中心的十字模式具有很高的分布概率的启发,BMA 的搜索模式可以仿照十字模式,在保持失真率变化不大的前提下以减少搜索点数。

2.2 搜索策略

十字交叉六边形搜索分为两种模式:十字模式和六边形模式,其中:十字模式分为大十字模式和小十字模式,如图 2(a)。大十字模式的 7 个搜索点为图 1 中的 $A+B+C$,约有 74.71% 的运动矢量 MV 分布在其范围内;小十字模式的 5 个搜索点为 $A+B$,约有 68.98% 的运动矢量 MV 分布在其范围内。



(a) 十字模式
(a) Cross pattern



(b) 传统六边形模式 (b) Traditional hexagon pattern
(c) 新型六边形模式 (c) New hexagon pattern

图 2 新型十字交叉六边形搜索中的搜索模式

Fig. 2 Search patterns used in proposed NHEXS algorithm

六边形模式分为大六边形模式和小六边形模式。本文所采用的大六边形搜索模式除了包含传统六边形的六个搜索顶点和中心点之外,如图 2(b),还包含六边形中分别位于搜索中心点正上方和正下方的两条边的中点,如图 2(c)。这样新的大六边形搜索模式共包含了 9 个搜索点,可以实现在基本没有增加大六边形搜索算法运算复杂度的前提下,大大提高了搜索的速度。

从对大量的视频序列测试可以发现:视频帧

中大约 70% 的块是静止的或准静止的。依据这一特性,在改进的十字交叉六边形搜索算法的前两步我们采用小十字模式,而并非首先使用大十字模式进行搜索,从而使得在静止块和准静止块中,可以用更少的搜索点便可找到匹配块。然后搜索大十字模式没有搜索到的点和准静止区域中没有搜索到的点,以为下面的六边形搜索找到更精确的搜索方向。

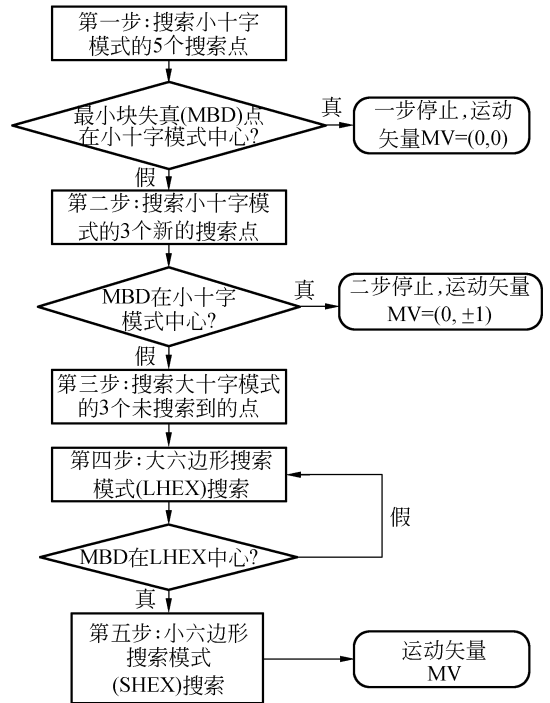


图 3 新型十字交叉六边形运动估计搜索方法的流程图
Fig. 3 Flowchart of NHEXS algorithm

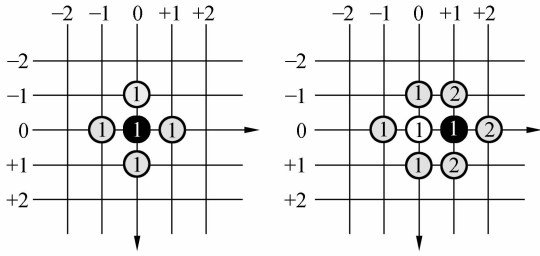
图 3 和图 4 分别为本文算法的流程图以及一个搜索示例。算法具体步骤如下:

(1)(小十字模式)应用改进的部分块失真准则,在小十字模式中的 5 个搜索点中搜索最小块失真 MBD 所在点。如图 4(a)所示,此步骤中小十字模式的 5 个搜索点用①表示。如果最小块失真 MBD 点在小十字模式的中心,即中心的黑色的①位置处,此时一步搜索停止,得到最终要求的运动矢量 $MV(0, 0)$;否则,进入步骤(2);

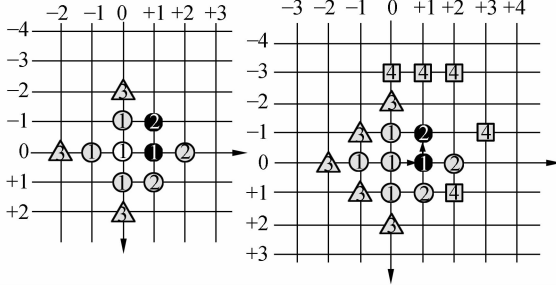
(2)(小十字模式)以步骤(1)搜索到的最小块失真 MBD 点为中心构造新的小十字模式,应用改进的部分块失真准则,此时需要搜寻 3 个新的搜索点,如图 4(b)中的增加的②所示。紧接着再搜索最小块失真 MBD 点,如果该点在小十字模

式的中心,即中心的黑色的①位置处,二步搜索停止,得到最终要求的运动矢量 $MV(\pm 1, 0)$ 或 $(0, \pm 1)$; 否则,进入步骤(3);

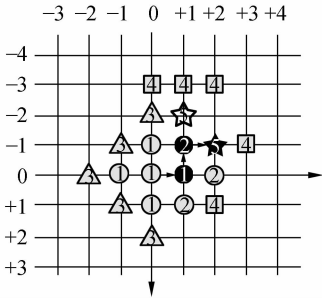
(3)(大十字模式)搜索大十字模式 3 个还没有搜索到的点,如图 4(c)中的增加的③所示。应用改进的部分块失真准则,搜索新的最小块失真 MBD 点,如黑色的②位置处,以作为下一步搜索的中心;



(a)小十字模式 (b)小十字模式
(a)Small cross pattern (b)Small cross pattern



(c)大十字模式 (d)大六边形模式
(c)Large cross pattern (d)Large hexagon pattern



(e)小六边形模式
(e)Small hexagon pattern

图 4 新型十字交叉六边形运动估计搜索算法搜索示例
Fig. 4 Search examples of NHEXS algorithm

(4)(大六边形模式)以上一步的最小块失真 MBD 点为中心,构造大六边形搜索模式,如图 4

(d)中的增加的④所示。应用改进的部分块失真准则,找出新的最小块失真 MBD 点,如果该点在大六边形的中心,即中心的黑色的②位置处,进入步骤(5); 否则,继续步骤(4);

(5)(小六边形模式)以步骤(4)所搜索到的位于大六边形的中心的最小块失真 MBD 点为中心,构造小六边形搜索模式,如图 4(e)中的增加的⑤所示。应用改进的部分块失真准则,找出新的最小块失真 MBD 点,如黑色的⑤位置处,该点所对应的向量即为最终要求的运动矢量。

2.3 搜索策略分析

相比六边形搜索法和现有的十字菱形搜索法,本文的十字交叉六边形搜索法最大的改进是搜索点数减少,搜索速度提高,尤其是对静止块或准静止块($|MV|=1$)。对于静止块,六边形搜索法需要搜索 13 个搜索点,现有的十字菱形搜索法需要搜索 9 个点,而本文的十字交叉六边形搜索法只需要搜索 5 个点;对于准静止块,六边形搜索法需要搜索 13 个搜索点,现有的十字菱形搜索法需要搜索 11 个点,而本文的十字交叉六边形搜索法只需要搜索 7 个点。

2.4 改进的部分块失真准则

在块匹配算法 BMA 中,运动估计通常使用块的全部像素来计算失真度,这大大增加了计算的复杂度。实际上只使用块其中的一部分像素就可以对失真度有较好的度量。十字交叉六边形搜索法采用改进的部分块失真准则,即只使用块其中的一部分像素就可以对失真度有较好的度量。

当块的大小为 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$ 时,第 n 帧左上角坐标为 (m, n) 的块与第 $n-1$ 帧左上角坐标为 $(m+p, n+q)$ 的块间的失真度量 SAD 值由下式给出:

$$SAD(m, n; p, q) = \sum_{i=0}^{15} \sum_{j=0}^{15} | f_n(m+i, n+j) - f_{n-1}(m+p+i, n+q+j) |, \quad (1)$$

其中, $f_n(m+i, n+j)$ 表示第 n 帧坐标为 $(m+i, n+j)$ 像素点的像素值。

将失真度量 $SAD(m, n; p, q)$ 分成 16 个部分失真度量 $sad_k(m, n; p, q) (k=1, 2, \dots, 16)$ 。第 k 个部分失真度量的定义如下式所示:

$$\text{sad}_k(m, n; p, q) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 |f_n(m+4i+s_k, n+4j+t_k) - f_{n-1}(m+p+4i+s_k, n+q+4j+t_k)|, \quad (2)$$

其中 s_k, t_k 分别为第 k 个部分失真度量所在左上角像素点相对于块左上角的水平和垂直偏移。部分失真度量 $\text{sad}_k(m, n; p, q) (k=1, 2, \dots, 16)$ 的计算顺序如图 5 方框内序号所示。

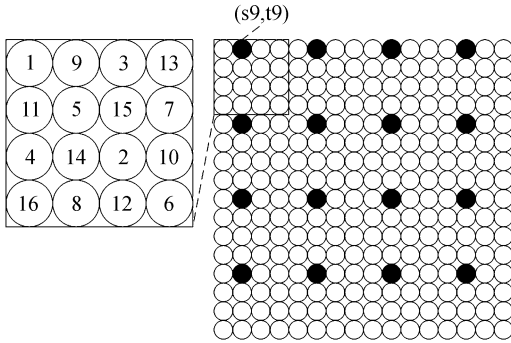


图 5 改进的部分失真准则所用到的搜索点

Fig. 5 Search points used in Modified Partial Distortion Criterion (MPDC)

第 k 次累加部分失真度量的定义如下式所示:

$$\text{SAD}_k(m, n; p, q) = \sum_{i=1}^k \text{sad}_i(m, n; p, q), \quad (3)$$

对于累加部分失真度量来说,这样的计算顺序使其用到的像素点在块内均匀分布。

如果进行判断时累加部分失真度量 $\text{SAD}_k(m, n; p, q)$ 所用的像素点太少,则不能正确表征块的失真,非常可能造成失误。对大量的测试序列进行实验,发现当 $k \geq 3$ 时,误判的概率 $< 5\%$ 。

如果第 k 次累加部分失真度量满足

$$16 \times \text{SAD}_k(m, n; p, q) > k \times \min(\text{SAD}), \quad (4)$$

其中 $\min(\text{SAD})$ 是搜索过程中当前得到的最小失真, k 为自己设定的整数,取值范围为: $3 \leq k \leq 16$, 则认为该点不可能为匹配点。否则,继续计算第 $k+1$ 次累加部分失真度量 $\text{SAD}_{k+1}(m, n; p, q)$, 再进行比较。

计算表明,采用改进的部分失真准则,在 $K=4$ (误判的概率 $< 5\%$), 块的计算复杂度为 $64 \times 2 + 63 = 191$, 较完全失真准则的 $256 \times 2 + 255 = 767$ 次降低了 75% 。

3 实验与分析

为了验证新型十字交叉六边形搜索算法,对多个不同运动程度的视频序列进行了实验。计算机 CPU 为 Inter Core 2 Duo E6300, 主频 1.86 GHz, 内存 2 G, 在 Visual C++ 6.0 环境中进行编程。取宏块的大小为 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$, 搜索窗口的最大尺寸在水平和垂直方向上均为 $\pm 7 \text{ pixel}$, 失真准则采用了改进的部分块失真准则。

测试中用到了 6 个不同运动程度的视频序列 (分辨率为 $352 \text{ pixel} \times 288 \text{ pixel}$), 分别为低空间细节且运动缓慢的测试序列: container, hall; 中等空间细节且运动一般的测试序列: foreman, news, paris; 高空间细节且运动剧烈的测试序列: stefan。测试序列均取视频序列前面的 70 帧。

将十字交叉六边形搜索方法 NHEXS, 同现有的全搜索法 FS、三步搜索法 TSS、新型三步搜索法 NTSS、菱形搜索法 DS、十字菱形搜索法 CDS、新型十字菱形搜索法 NCDS、六边形搜索法 HEXS 在两个方面进行了对比: (1) 搜索点数: 每一帧测试序列搜索到最小块失真 MBD 点、即最佳匹配块所需要的搜索点数; (2) 峰值信噪比 PSNR: 用以衡量运动估计和补偿后的图像和原图像的差别。

对 6 个不同的视频序列, 用不同的搜索算法, 分别用完全失真准则和部分失真准则, 对前其 70 帧进行运动估计和补偿, 计算其每帧运动估计和补偿所用的时间, 具体数据如表 2 和表 3 所示。

表 2 完全失真准则下平均每帧搜索时间 (ms)

Tab. 2 Average search time per frame by Total Distortion Criterion

| | FS | TSS | NTSS | DS | CDS | NCDS | HEXS | NHEXS |
|-----------|-----|-----|------|----|-----|------|------|-------|
| Container | 486 | 70 | 62 | 50 | 43 | 33 | 47 | 38 |
| Hall | 453 | 65 | 56 | 49 | 42 | 31 | 44 | 36 |
| Foreman | 498 | 71 | 65 | 52 | 45 | 33 | 48 | 40 |
| News | 515 | 73 | 68 | 57 | 49 | 36 | 52 | 45 |
| Paris | 530 | 76 | 69 | 55 | 50 | 37 | 53 | 46 |
| Stefan | 561 | 80 | 72 | 66 | 57 | 45 | 61 | 50 |

表 3 部分失真准则下平均每帧搜索时间 (ms)

Tab. 3 Average search time per frame by Modified Partial Distortion Criterion (MPDC)

| | FS | TSS | NTSS | DS | CDS | NCDS | HEXS | NHEXS |
|-----------|-----|-----|------|----|-----|------|------|-------|
| Container | 323 | 46 | 43 | 32 | 27 | 20 | 29 | 22 |
| Hall | 323 | 46 | 43 | 31 | 25 | 24 | 29 | 29 |
| Foreman | 323 | 46 | 43 | 34 | 33 | 30 | 33 | 33 |
| News | 323 | 46 | 34 | 29 | 24 | 17 | 31 | 19 |
| Paris | 323 | 47 | 39 | 35 | 29 | 22 | 29 | 24 |
| Stefan | 323 | 47 | 46 | 39 | 36 | 29 | 35 | 32 |

从表 4 可以看出:在所有的视频测试序列中,NHEXS 所用到的搜索点数是所有搜索算法中最

少的。尤其对运动不太剧烈且背景变化不太大的视频序列,如 hall,NHEXS 较 HEXS 能节省 49% 的搜索点,NHEXS 较 NCDS 能节省 9.4% 的搜索点。对运动剧烈且背景有较大变化的视频序列,如 stefan,NHEXS 也有较好的效果。

从表 5 可以看出:相比于 NCDS 和 HEXS,NHEXS 的平均峰值信噪比 PSNR 下降的很少(大约有 0~1.4 dB 的下降),尤其是对测试序列背景变化不大的视频,NHEXS 拥有和 NCDS 以及 HEXS 差不多的 PSNR。

表 4 每帧的平均搜索点数

Tab. 4 Average search points per frame

| | 平均搜索点数 | | | | | | | | 对比 | | | | | | |
|-----------|--------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| | FS | TSS | NTSS | DS | CDS | NCDS | HEXS | NHEXS | Δ FS | Δ TSS | Δ NTSS | Δ DS | Δ CDS | Δ NCDS | Δ HEXS |
| Container | 80500 | 8813 | 5965 | 4502 | 3136 | 1614 | 3727 | 1581 | -98.0% | -82.1% | -73.5% | -49.6% | -7.7% | -2.0% | -57.6% |
| Hall | 80500 | 8813 | 6225 | 4635 | 3458 | 2108 | 3745 | 1910 | -97.6% | -78.3% | -69.3% | -44.8% | -41.4% | -9.4% | -49.0% |
| Foreman | 80500 | 8813 | 7754 | 5974 | 5378 | 5881 | 4548 | 4289 | -94.7% | -51.3% | -44.7% | -20.2% | -23.5% | -27.1% | -5.7% |
| News | 80500 | 8813 | 6069 | 4595 | 3347 | 2088 | 3779 | 1885 | -97.74% | -78.6% | -68.9% | -43.7% | -44.2% | -9.7% | -50.1% |
| Paris | 80500 | 8813 | 6205 | 4728 | 3607 | 2552 | 3864 | 2193 | -97.3% | -75.1% | -64.7% | -39.2% | 4.5% | -14.1% | -43.2% |
| Stefan | 80500 | 8813 | 9611 | 7439 | 7825 | 8918 | 5438 | 6166 | -92.3% | -30.0% | -35.8% | -21.2% | -11.2% | -30.9% | 13.4% |

表 5 平均峰值信噪比 PSNR

Tab. 5 Average PSNRs

| | 平均搜索点数 | | | | | | | | 对比 | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| | FS | TSS | NTSS | DS | CDS | NCDS | HEXS | NHEXS | Δ FS | Δ TSS | Δ NTSS | Δ DS | Δ CDS | Δ NCDS | Δ HEXS |
| Container | 38.361 | 38.360 | 38.360 | 38.360 | 38.360 | 38.360 | 38.360 | 38.360 | -0.001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hall | 34.330 | 34.238 | 34.229 | 34.237 | 34.188 | 34.072 | 34.138 | 34.045 | -0.285 | -0.193 | -0.184 | -0.192 | -0.143 | -0.027 | -0.093 |
| Foreman | 33.569 | 32.857 | 33.357 | 33.286 | 33.241 | 32.939 | 32.466 | 32.617 | -0.952 | -0.24 | -0.74 | -0.669 | -0.624 | -0.322 | 0.151 |
| News | 38.392 | 38.263 | 38.279 | 38.321 | 38.313 | 38.248 | 38.177 | 38.225 | -0.167 | -0.038 | -0.054 | -0.096 | -0.088 | -0.023 | 0.048 |
| Paris | 30.559 | 30.246 | 30.494 | 30.466 | 30.419 | 30.271 | 30.204 | 30.274 | -0.285 | 0.028 | -0.22 | -0.192 | -0.145 | 0.003 | 0.07 |
| Stefan | 24.778 | 24.748 | 24.753 | 24.167 | 24.167 | 23.305 | 24.158 | 23.329 | -1.449 | -1.419 | -1.424 | -0.838 | -0.838 | 0.024 | -0.829 |

针对视频 news,抽取其任意一帧,取第 20 帧,如图 6(b)所示,图 6(a)是其参考帧第 19 帧,应用 NHEXS 进行运动估计和补偿,得到其补偿



(c) 运动补偿后的第 20 帧

(c) Motion compensated 20th frame

图 6 “news”视频中第 19 帧、20 帧的原始图像、运动矢量图以及运动估计和补偿图像

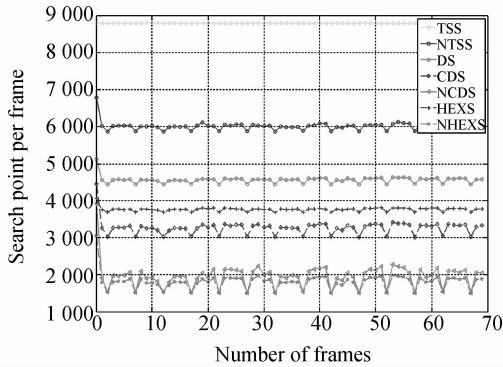
Fig. 6 The original 19th and 20th frames of “news”, motion vectors and the motion compensated 20th frame

(a) “news”的第 19 帧

(b) “news”的第 20 帧

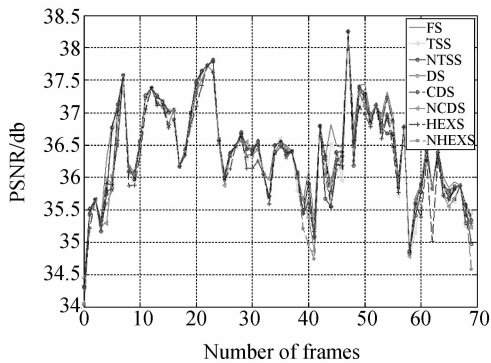
(a) The 19th frame of “news” (b) The 20th frame of “news”

后图像如图 6(c)所示。



(a) 每帧的搜索点数

(a) Search points per frame



(b) 每帧的信噪比

(b) PSNRs per frame

图 7 对 news 视频前 70 帧逐帧进行运动估计

Fig. 7 Motion estimation results of the first 70 frames of "news"

对中等空间细节且运动一般的测试序列 news 的前 70 帧的每一帧的搜索点数和峰值信噪比 (PSNR) 做了实验,其结果如图 7 所示。

由以上可知本文算法对各种测试视频序列都有较好的适应性,搜索点数明显降低,从而有效地减少了搜索时间,而运动估计和补偿后的图像的峰值信噪比 PSNR 降低很少甚至没有变化。

4 结 论

本文提出了一种新型的十字交叉六边形运动估计搜索算法,依据视频序列中运动向量的分布特点,对传统的六边形搜索算法做出了改进,在六边形搜索之前加上十字形搜索,使其进一步符合视频序列间运动向量的运动规律,减少了寻找最优匹配块的搜索点数,从而缩短了搜索时间。

本文同时对最优匹配准则进行了优化,在不影响判别失真度情况下,大大降低了计算复杂度,缩短了计算时间。实验测试结果表明:本文算法对各种测试视频序列都有较好的适应性,尤其是对背景变化不太大的序列,搜索点数比六边形搜索算法和新型十字菱形搜索算法分别节省了 32% 和 6%,搜索时间有较大减少,而搜索质量降低很少甚至没有变化。

参考文献:

- [1] 禹晶, 苏开娜. 块运动估计的研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2006, 12(12): 2031-2041.
YU J, SU K N. A survey of block-based motion estimation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 12(12): 2031-2041. (in Chinese)
- [2] LI R X, ZENG B, LIOU M L. A new three-step search algorithm for block motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1994, 4(4): 438-442.
- [3] PO L M, MA W C. A novel four-step search algorithm for fast block motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video*

- Technology*, 1996, 6(3): 313-317.
- [4] LIU L K, FEIG E. A block based gradient descent search algorithm for block motion estimation in video coding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(4): 419-422.
- [5] ZHU S, MA K K. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(2): 287-290.
- [6] CHEUNG C H, PO L M. A novel cross-diamond search algorithm for fast block motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(12): 1168-1177.

- [7] JIA H J, ZHANG L. A new cross diamond search algorithm for block motion estimation[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Canada: IC-ASSP*, 2004: 357-360.
- [8] ZHU C, LIN X, CHAU L P. Hexagon-based search pattern for fast block motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(5): 349-355.
- [9] 倪伟, 郭宝龙, 丁贵广, 等. 基于运动矢量场和方向自适应的快速运动估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(12): 2277-2282.
NI W, GUO B L, DING G G, *et al.*. A fast motion estimation algorithm based on motion vector field and direction adaptive techniques[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(12): 2277-2282. (in Chinese)
- [10] CHEUNG C H, PO L M. Normalized partial distortion search algorithm for block motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, 10(3): 417-422.
- [11] CHEUNG C H, PO L M. Adjustable partial distortion search algorithm for fast block motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(1): 100-110.

作者简介:



祝世平(1970—),男,河北深泽人,副教授,1991年、1994年在西安理工大学分别获得学士、硕士学位,1997年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事图像处理和视频压缩、计算机视觉、机器视觉在精密测量中的应用等方面的研究工作。E-mail: shiping.zhu@buaa.edu.cn



申晓东(1982—),男,湖南邵阳人,工程师,2005年于湖南科技大学获得学士学位,2009年于北京航空航天大学获得硕士学位,清华怡文科技有限公司工程师,主要从事工程嵌入式软件开发和环境监控数据可靠性方面的研究工作。E-mail: shen-xiaodong@163.com

●下期预告

关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识

王 文, 林 铿, 高贯斌, 陈子辰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

关节臂式坐标测量机是一种采用角度传感器(如圆光栅)测量关节转角、并通过坐标转换求得测头空间三维坐标的非正交坐标测量系统。圆光栅角度传感器的分度盘安装存在偏心误差,将直接影响系统的测量精度。论文建立了一种六自由度关节臂式坐标测量机的坐标系统,分析了圆光栅分度盘的安装偏心对角度测量的影响,推导了由于偏心引起的测量误差及其修正公式,分析表明,较小的安装偏心便会引起较大的角度测量偏差。以测量机的单点重复测量精度为目标函数,提出了一种基于模拟退火算法的角度传感器偏心参数辨识方法,并将其用于测量机关节圆光栅 12 个偏心参数的辨识和修正,实验结果表明:修正之后测量机的重复测量精度提高了 11.3%。