

**АЛГОРИТМЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ
ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ МЕЖКАДРОВОЙ РАЗНОСТИ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ****В. А. Иванов***Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: vaivanov@iae.nsk.su*

Для системы наблюдения с матричным фотодетектором и колеблющейся оптической осью сравниваются виды интерполяции при формировании межкадровой разности с целью уменьшения влияния стационарного фона при обнаружении точечных объектов. Рассматриваются методы интерполяции при наличии дробного сдвига (меньше шага матрицы фотодетектора). Проведены вычислительные эксперименты, которые оценивают эффективность методов интерполяции при обнаружении точечных объектов.

Введение. При обнаружении движущихся слабоконтрастных точечных объектов по последовательности изображений, получаемых матричным сенсором, необходимо подавлять стационарный фон. Одним из методов подавления стационарного фона является межкадровая обработка, заключающаяся в получении межкадровой разности (МКР) [1, 2] с целью достоверного выделения полезного сигнала (в данном случае движущегося малоразмерного объекта). Основной задачей при вычислении МКР является компенсация сдвига между соседними кадрами последовательности, который обусловлен колебаниями оптической оси сенсора. Дробный сдвиг (сдвиг меньше шага матрицы фотоприемника) между соседними кадрами считаем известным [3–5]. В данной работе проводится сравнение эффективности нескольких простых видов интерполяции по окрестности 2×2 точки для компенсации дробного сдвига при вычислении МКР двух соседних кадров, что важно для систем обнаружения с ограничениями на объем оперативной памяти и вычислительные ресурсы.

Модель сигнала. Модель входной последовательности кадров представим в виде

$$D(t) = F(t) + S(t) + \eta(t),$$

где $F(t)$ – стационарный фон; $S(t)$ – полезный сигнал; $\eta(t)$ – некоррелированный шум; t – номер кадра. Для компенсации стационарного фона используем МКР между текущим кадром $D(t+1)$ и его оценкой по опорному кадру $D(t)$:

$$\Delta D(t) = D(t+1) - \hat{D}(t).$$

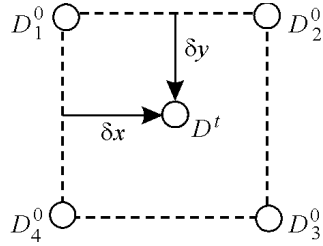


Рис. 1

Расположение точек на фрагменте опорного изображения 2×2 точки и точки текущего изображения представлено на рис. 1, где D_i^0 , $i = \overline{1, 4}$, – точки опорного изображения; D^t – точка текущего изображения; δx – сдвиг текущего кадра по координате X ; δy – сдвиг по координате Y .

Виды интерполяции. В данной работе

для сравнения использованы девять алгоритмов интерполяции, из которых первые семь

известны, а последние два предложены специально для вычисления МКР.

1. Простая разность $\hat{D}^t = D_1^0$.

2. Ближайший сосед $\hat{D}^t = D_i^0 (\min(\text{abs}(D^t - D_i^0)))$. В данном случае ближайший сосед выбирается не из минимального расстояния между точками опорного и текущего изображений, а из минимума модуля разности между значениями D^t и D_i^0 , $i = \overline{1, 4}$.

3. Среднее значение $\hat{D}^t = \left(\sum_{i=1}^4 D_i^0 \right) / 4$.

4. Взвешенное среднее $\hat{D}^t = \left(\sum_{i=1}^4 \rho_i D_i^0 \right) / \sum_{i=1}^4 \rho_i$, где $\rho_i = 1/r_i$ (r_i – рас-

стояние от D^t до точек D_i^0).

5. Медиана $\hat{D}^t = \text{median}(D_i^0)$, $i = \overline{1, 4}$.

6. Билинейная интерполяция

$$\hat{D}^t = \sum_{i=1}^4 a_i D_i^0, \quad (1)$$

где $a_1 = (1 - \delta x)(1 - \delta y)$, $a_2 = x(1 - \delta y)$, $a_3 = (1 - \delta x)y$, $a_4 = \delta x \delta y$.

7. Оценка линейного прогноза. Предположим, что \hat{D}^t зависит от D_i^0 , $i = \overline{1, 4}$, линейно, т. е. $D^t = \sum_{i=1}^4 L_i D_i^0$, где L_i , $i = \overline{1, 4}$, – параметры линейного

прогноза. Оценку получаем методом наименьших квадратов для критерия

$$I = \sum \left(D^t - \sum_{i=1}^4 L_i D_i^0 \right)^2 \text{ в виде } L = (V_0^T V_0)^{-1} (V_0^T W_t), \text{ где матрицы } V_0 \text{ и } W_t$$

сформированы из отсчетов фрагментов опорного и текущего изображений. Размер фрагмента, на котором оцениваются параметры линейного прогноза, выбирается из минимума среднеквадратичного отклонения (СКО) МКР, степени «гашения» объектов и вероятности обнаружения точечных объектов.

8. Билинейная интерполяция с рандомизацией данных. В качестве начальной оценки берется $\hat{D}_0^t = \sum_{i=1}^4 a_i D_i^0$. Далее D_i^0 заменяется величиной

$D_i^0 + c \xi_i^k$, где c – амплитуда шума; $k = \overline{1, K}$ – номер имитации случайного

шума; ξ_i^k – добавляемый независимый шум в точки опорного изображения.

Вычисляя $\hat{d}_k^t = \sum_{i=1}^4 a_i(D_i^0 + c\xi_i^k)$, получаем оценку

$$\hat{D}^t = \arg \min_k (abs(D^t - \hat{d}_k^t)).$$

Выбор вида и амплитуды шума, а также число имитаций зависят от решаемой задачи и контекста обрабатываемых изображений (кроме того, необходимо учитывать вычислительные затраты). Шум взят равномерным с нулевым средним, а его амплитуда – порядка значения СКО простой МКР. Число имитаций в алгоритме выбирается из условий малых изменений СКО МКР.

9. Линейная интерполяция с минимизацией. Предлагается использовать линейную интерполяцию плоскостями P_i , $i=1, 4$, проходящими через каждые три точки D_i^0 , $i=1, 4$, опорного изображения. Вычисляются значения $p_i(\delta x, \delta y)$ для каждой плоскости P_i , $i=1, 4$:

$$p_1(\delta x, \delta y) = D_1^0 + \delta x(D_2^0 - D_1^0) + \delta y(D_4^0 - D_1^0),$$

$$p_2(\delta x, \delta y) = D_1^0 + \delta x(D_2^0 - D_1^0) + \delta y(D_3^0 - D_2^0),$$

$$p_3(\delta x, \delta y) = D_1^0 + \delta x(D_3^0 - D_4^0) + \delta y(D_4^0 - D_1^0),$$

$$p_4(\delta x, \delta y) = D_3^0 - (1 - \delta x)(D_4^0 - D_3^0) - (1 - \delta y)(D_2^0 - D_3^0).$$

Далее получаем оценку

$$\hat{D}^t = \arg \min_i (abs(D^t - p_i(\delta x, \delta y))), \quad i=\overline{1, 4}.$$

Критерии сравнения. Здесь выбраны два критерия, которые характеризуют основные качества межкадровой обработки при обнаружении объектов.

1. Отношение $\bar{s}/\sigma(\Delta D(t))$ (среднего значения величины амплитуды объектов \bar{s} в МКР к СКО шума межкадровой разности $\sigma(\Delta D(t))$).

2. Вероятность обнаружения объектов при фиксированном числе выделяемых отметок.

Моделирование. Для имитации дробного сдвига в паре изображений используется одно изображение на «подробной» решетке. Сдвиг между опорным и текущим изображениями кратен шагу подробной решетки, а значения в точках обрабатываемых кадров соответствуют средним значениям яркости фрагментов (9×9) изображений на подробной решетке. Размер исходного изображения, которое сформировано пакетом трехмерной графики PovRay [6], на подробной решетке принят равным 2048×2048 точек. Размер обрабатываемых изображений 227×227 точек, диапазон яркостей составлял 0–255. Вычислительные эксперименты были проведены для четырех пар изображений с различными радиусами корреляции фона rf : $rf \sim 4$ (118,70; 32,48), $rf \sim 7,5$ (117,81; 33,51), $rf \sim 12$ (120,29; 33,27), $rf \sim 24$ (116,41; 35,15) (в

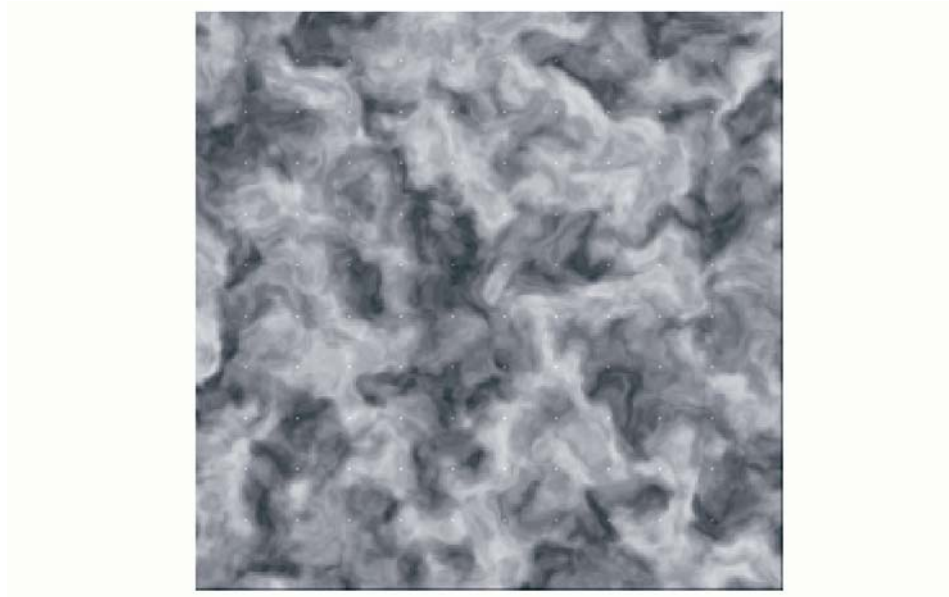


Рис. 2

скобках даны среднее значение и СКО опорных изображений). Текущее изображение с нанесенными объектами для $rf = 12$ приведено на рис. 2.

Результаты моделирования. В вычислительных экспериментах сдвиг принят $\delta x = 6$ и $\delta y = 6$ в шагах подробной решетки как менее благоприятный вариант. Размер фрагмента, на котором оценивались параметры линейного прогноза 7, подбирался по минимуму СКО МКР и наибольшей величине отношения $\max(\bar{s}/\sigma(\Delta D(t)))$ и составил 32×32 точки. Выбор параметров в алгоритме 9 осуществлялся по тем же критериям, что и для линейного прогноза. Шум взят равномерным в диапазоне $\pm 0,5$ с амплитудой $c = 10$, что соответствует значению СКО простой МКР. Число имитаций равно 5. На текущее изображение наносились 100 объектов путем добавления к яркости фона величин одинаковой амплитуды a^0 в точках изображения.

В табл. 1 приведены среднее значение амплитуды объектов \bar{s} в МКР, СКО $\sigma(\Delta D(t))$ МКР и их отношение $\bar{s}/\sigma(\Delta D(t))$. Величина \bar{s} характеризует «гашение» амплитуды объектов, $\sigma(\Delta D(t))$ – компенсацию стационарного фона, отношение $\bar{s}/\sigma(\Delta D(t))$ – вероятность обнаружения.

Из таблицы видно, что при малом радиусе корреляции ($rf \sim 4$) алгоритмы по приведенным параметрам отличаются незначительно, так как фон является слабо коррелированным шумом и нивелирует свойства алгоритмов. Алгоритм 7 «гасит» объекты больше других, что связано с размером фрагмента, по которому оцениваются параметры линейного прогноза. Простая разность в данном сравнении не рассматривалась, так как по другим параметрам имеет худшие характеристики. СКО для МКР в среднем лучше для алгоритмов 6–9, и их преимущество растет с увеличением радиуса корреляции. Величина отношения $\bar{s}/\sigma(\Delta D(t))$ больше для двух последних видов интерполяции, что обусловлено лучшей компенсацией стационарного фона.

Результаты обнаружения объектов, которые добавлялись к фону, даны в табл. 2. Число выделяемых отметок принято равным 120, что соответствует

Т а б л и ц а 1

Номер алгоритма	rf	Амплитуда объектов					
		$a^0 = 5$			$a^0 = 10$		
		\bar{s}	$\sigma(\Delta D(t))$	$\bar{s}/\sigma(\Delta D(t))$	\bar{s}	$\sigma(\Delta D(t))$	$\bar{s}/\sigma(\Delta D(t))$
	4	2,4348	16,7493	0,1454	7,4348	16,7521	0,4438
		5,5484	5,6410	0,9836	10,5484	5,6552	1,8652
		4,6454	6,9386	0,6695	9,6454	6,9489	1,3880
		4,8996	6,9088	0,7092	9,8996	6,9195	1,4307
		4,7843	7,1148	0,6724	9,7843	7,1250	1,3732
		4,7971	6,7190	0,7139	9,7971	6,7299	1,4557
		4,2223	6,6336	0,6365	9,1772	6,6448	1,3811
		4,6165	5,5130	0,8374	9,8042	5,5243	1,7748
		4,8377	4,5315	1,0676	9,8377	4,5477	2,1632
	7,5	5,7746	11,4683	0,5035	10,7746	11,4753	0,9389
		4,9652	4,0866	1,2150	9,9652	4,1048	2,4277
		5,1200	4,1158	1,2440	10,1200	4,1343	2,4478
		4,8065	4,1206	1,1664	9,8065	4,1384	2,3696
		5,1858	4,1808	1,2404	10,1858	4,1991	2,4257
		4,9780	3,9422	1,2627	9,9780	3,9612	2,5189
		4,6220	3,8752	1,1927	9,5832	3,8955	2,4601
		5,0172	2,8481	1,7616	9,7764	2,8815	3,3928
		4,9657	2,6298	1,8883	9,9657	2,6581	3,7492
	12	5,1732	7,1797	0,7205	10,1732	7,1900	1,4149
		5,0573	2,7104	1,8659	10,0573	2,7381	3,6731
		4,6665	2,2751	2,0511	9,6665	2,3065	4,1909
		4,6485	2,2938	2,0266	9,6485	2,3248	4,1502
		4,6191	2,2990	2,0091	9,6191	2,3299	4,1286
		4,6481	2,1530	2,1589	9,6481	2,1860	4,4135
		4,5704	2,1174	2,1586	9,5320	2,1538	4,4256
		4,7082	1,2757	3,6908	9,8858	1,3254	7,4586
		4,9487	1,4314	3,4571	9,9487	1,4827	6,7097
	24	4,6177	4,1859	1,1032	9,6177	0,2024	2,2886
		5,2854	1,7101	3,0908	10,2854	1,7551	5,8602
		4,8632	1,1912	4,0826	9,8632	1,2517	7,8798
		4,9130	1,2121	4,0534	9,9130	1,2719	7,7937
		4,9577	1,1997	4,1324	9,9577	1,2605	7,8997
		4,8888	1,1125	4,3945	9,8888	1,1772	8,4000
		4,8451	1,0683	4,5354	9,7981	1,1413	8,5850
		4,9077	0,5775	8,4989	9,9234	0,6937	14,3052
		4,9536	0,7473	6,6283	9,9536	0,8415	11,8288

вероятности ложной тревоги $\sim 0,00038$. Обнаружение отметок проводилось в МКР по порогу, который выбирался из условий выделения заданного числа отметок. Число отметок в экспериментах не всегда равно 120, а несколько меньше из-за дискретного шага порога. Данные приведены для отношения сигнал/шум $\sim 5-6$, которое определялось амплитудой отметок для различных значений rf .

Т а б л и ц а 2

Номер алгоритма	$rf = 4$	$rf = 7,5$	$rf = 12$	$rf = 24$
	$a^0 = 30$	$a^0 = 20$	$a^0 = 10$	$a^0 = 5$
Число обнаруженных объектов и отметок				
1	5 116	10 120	6 118	5 120
2	79 120	72 120	21 119	22 120
3	81 118	93 120	79 120	75 119
4	77 120	90 120	78 118	77 119
5	73 120	86 120	75 120	75 120
6	83 120	95 120	81 119	81 119
7	81 119	94 119	86 120	85 120
8	91 120	98 120	94 120	100 120
9	98 120	99 120	98 120	98 119
Номер алгоритма	$a^0 = 15$	$a^0 = 10$	$a^0 = 5$	$a^0 = 3$
1	0 118	0 118	1 117	3 119
2	9 120	3 120	3 119	6 118
3	13 117	21 119	7 118	19 119
4	18 120	22 120	13 120	22 118
5	12 120	17 120	7 118	18 119
6	16 117	24 117	12 119	23 116
7	20 119	27 118	15 120	31 118
8	17 119	24 119	14 118	73 117
9	39 120	50 119	42 120	63 118

В табл. 3 приведены результаты обнаружения объектов для изображений с $rf \sim 12$ и $a^0 = 10$ при различных дробных смещениях, которые подтверждают преимущества вариантов интерполяции 8, 9. Из таблицы видно, что вариант смещений $\delta x = 6$, $\delta y = 6$ является неблагоприятным для всех алгоритмов.

Т а б л и ц а 3

Номер алгоритма	Смещения $\delta x, \delta y$								
	2,2	2,6	2,8	6,2	6,6	6,8	8,2	8,6	8,8
Число обнаруженных объектов									
1	99	10	7	8	6	5	6	4	5
2	99	39	88	39	21	46	87	52	79
3	14	25	16	21	79	43	12	39	27
4	99	81	75	83	78	78	77	79	62
5	10	21	11	18	75	39	8	36	21
6	100	96	100	98	81	91	100	89	98
7	100	96	100	97	86	94	100	90	100
8	100	99	100	100	93	99	100	99	100
9	100	100	100	100	98	100	100	99	100

Заключение. Для алгоритма обнаружения малоразмерных подвижных объектов, использующего метод межкадровой обработки, проведено сравнение девяти видов интерполяции, компенсирующих сдвиг соседних кадров. Вычислительным экспериментом показано, что предложенные варианты интерполяции 8, 9 по принятым критериям дают в среднем лучшие результаты. По вычислительной сложности алгоритмы 1–6 значительно проще, чем алгоритмы 7–9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Киричук В. С., Коршевер И. И., Синельщиков В. В.** Анализ изображений динамических сцен: модели, алгоритмы и системы реального времени // *Автометрия*. 1998. № 3. С. 3.
2. **Киричук В. С., Косых В. П., Курманбек уулу Т.** Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // *Автометрия*. 2006. **42**, № 1. С. 3
3. **Губанов А. В., Ефимов В. М., Киричук В. С. и др.** Методы оценивания взаимного смещения фрагментов цифровых изображений // *Автометрия*. 1988. № 3. С. 70.
4. **Панкова Т. Л., Резник А. Л.** Эффективность алгоритмов прецизионного совмещения цифровых изображений // *Автометрия*. 1991. № 5. С. 39.
5. **Reznik A. L.** Algorithms for high-precision estimation of the coordinate shift of fragments in digital images // *Pat. Recogn. and Image Analysis*. 1998. **8**, N 2. P. 248.
6. <http://www.povray.org>

Поступила в редакцию 25 декабря 2006 г.