

Оценка параметров смещения и угла поворота при совмещении видеосигналов

Р.Р. Диязитдинов

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

В статье рассматривается задача оценки параметров смещения и угла поворота при совмещении видеосигналов. Предложенный алгоритм является обобщением алгоритма совмещения, разработанного исследователями Лукас и Канаде, известного как алгоритм оценки оптического потока. Исходный алгоритм Лукаса – Канаде позволяет оценивать параметры смещения, а предложенный автором – также и угол поворота. Идея совмещения базируется на разложении сигнала в ряд Тейлора и замене функций синуса и косинуса на приближенные функции.

Ключевые слова: совмещение видеосигналов, оценка смещения и угла поворота, оптический поток, переборный алгоритм, корреляционный алгоритм, алгоритм Лукаса – Канаде.

Введение

Обработка видеосигналов является бурно развивающейся областью исследования. Высокая информативность видеосигналов используется при разработке оптических измерительных устройств (например, триангуляционных оптических датчиков), а также в составе интеллектуальных систем технического зрения. Задача совмещения видеосигналов часто возникает в составе более общих задач:

- распознавания объектов;
- определения положения объектов в кадре;
- оценки траектории движения;
- сжатия потока видео данных (расчета разности между двумя кадрами) и т. д.

В настоящее время существует два основных направления в этой области. Первое направление – это использование переборных методов. Неизвестные параметры оцениваются путем сравнения видеосигналов по минимуму среднеквадратичного отклонения [1–4] или максимуму коэффициента корреляции [2; 3; 5].

Недостатком переборных алгоритмов является высокая вычислительная нагрузка на процессор. Оценка параметров связана с генерированием видеосигналов, соответствующих сочетанию оцениваемых параметров.

Второе направление базируется на разложении одного из сигналов в ряд Тейлора и последующим решением системы линейных уравнений,

корни которого являются оценкой параметров совмещения. Основателями второго направления являются исследователи Лукас и Канаде [6; 7]. Предложенная ими математическая модель повсеместно распространилась в научных кругах и практических разработках. Алгоритмы этой группы получили название оценки оптического потока (optical flow).

Существуют различные усовершенствования этого алгоритма (использование полинома вместо линейной аппроксимации [8], использование информации о соседних областях видеосигнала [9]). Также в работах [10–12] было предложено оценивать угол поворота с использованием разложения в ряд Тейлора.

Однако в настоящий момент не рассматривалось задачи одновременной оценки параметров смещения и угла поворота на базе разложения в ряд Тейлора.

Целью работы является разработка алгоритма совмещения видеосигнала по параметрам смещения и угла поворота. Данный алгоритм представляет собой обобщение алгоритмов, представленных в работах [6; 7; 10–12].

1. Постановка задачи

Пусть заданы два видеосигнала в виде двух поверхностей $f(x, y)$ и $g(x, y)$, где аргументы x, y принимают дискретные значения x_i, y_i соответственно.

Положим, что $f(x, y)$ и $g(x, y)$ – это регистрация одного и того же сигнала $s(x, y)$ в некоторые моменты времени. Разница заключается лишь в наличии смещения по осям x, y и угле поворота.

В таком случае можно записать, что:

$$f(x_i, y_i) = s(x_i, y_i) + k(x_i, y_i), \tag{1}$$

$$g(x_i, y_i) = s(x'_i, y'_i) + m(x_i, y_i), \tag{2}$$

где

$$x'_i = x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) + h;$$

$$y'_i = x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) + p;$$

h, p – смещения, которые необходимо оценить; α – угол поворота, который необходимо оценить; $k(x_i, y_i), m(x_i, y_i)$ – реализации шума.

В формулу (1) подставим значения x'_i, y'_i вместо x_i, y_i и выразим функцию $s(x, y)$:

$$s(x'_i, y'_i) = f(x'_i, y'_i) - k(x'_i, y'_i), \tag{3}$$

Подставим выражение (3) в формулу (2), получим:

$$g(x_i, y_i) = f(x'_i, y'_i) - k(x'_i, y'_i) + m(x_i, y_i). \tag{4}$$

После подстановки выражений для x'_i, y'_i и введения обозначения $n(x_i, y_i) = -k(x'_i, y'_i) + m(x_i, y_i)$, можно записать:

$$g(x_i, y_i) = f(x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) + h, x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) + p) + n(x_i, y_i). \tag{5}$$

Если положить, что угол α мал, то можно сделать следующую замену: $\cos(\alpha) \approx 1, \sin(\alpha) \approx \alpha$, тогда можно записать:

$$\begin{aligned} & f(x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) + \\ & + h, x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) + p) \approx \\ & \approx f(x_i - y_i \alpha + h, x_i \alpha + y_i + p) = \\ & = f(x_i + (h - y_i \alpha), y_i + (p + x_i \alpha)). \end{aligned}$$

Раскладывая функцию f в окрестности точки (x_i, y_i) , получим:

$$\begin{aligned} & f(x_i + (h - y_i \alpha), y_i + (p + x_i \alpha)) \approx \\ & \approx f(x_i, y_i) + \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial x} (h - y_i \alpha) + \\ & + \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial y} (p + x_i \alpha). \end{aligned}$$

Вводя обозначения:

$$q(x_i, y_i) = \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial x} \approx \frac{f(x_{i+1}, y_i) - f(x_i, y_i)}{x_{i+1} - x_i},$$

$$r(x_i, y_i) = \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial y} \approx \frac{f(x_i, y_{i+1}) - f(x_i, y_i)}{y_{i+1} - y_i},$$

получаем результирующее выражение:

$$\begin{aligned} & f(x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) + \\ & + h, x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) + p) \approx \\ & \approx f(x_i, y_i) + q(x_i, y_i)(h - y_i \alpha) + \\ & + r(x_i, y_i)(p + x_i \alpha). \end{aligned} \tag{6}$$

Для оценки параметров h, p и α воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК):

$$\begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^N [g(x_i, y_i) - f(x_i, y_i) - \\ & - q(x_i, y_i)(h - y_i \alpha) - r(x_i, y_i)(p + x_i \alpha)]^2 \rightarrow \\ & \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Решение определяется путем приравнивания частных производных к нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial h} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial p} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0.$$

В результате определяется следующая система линейных уравнений:

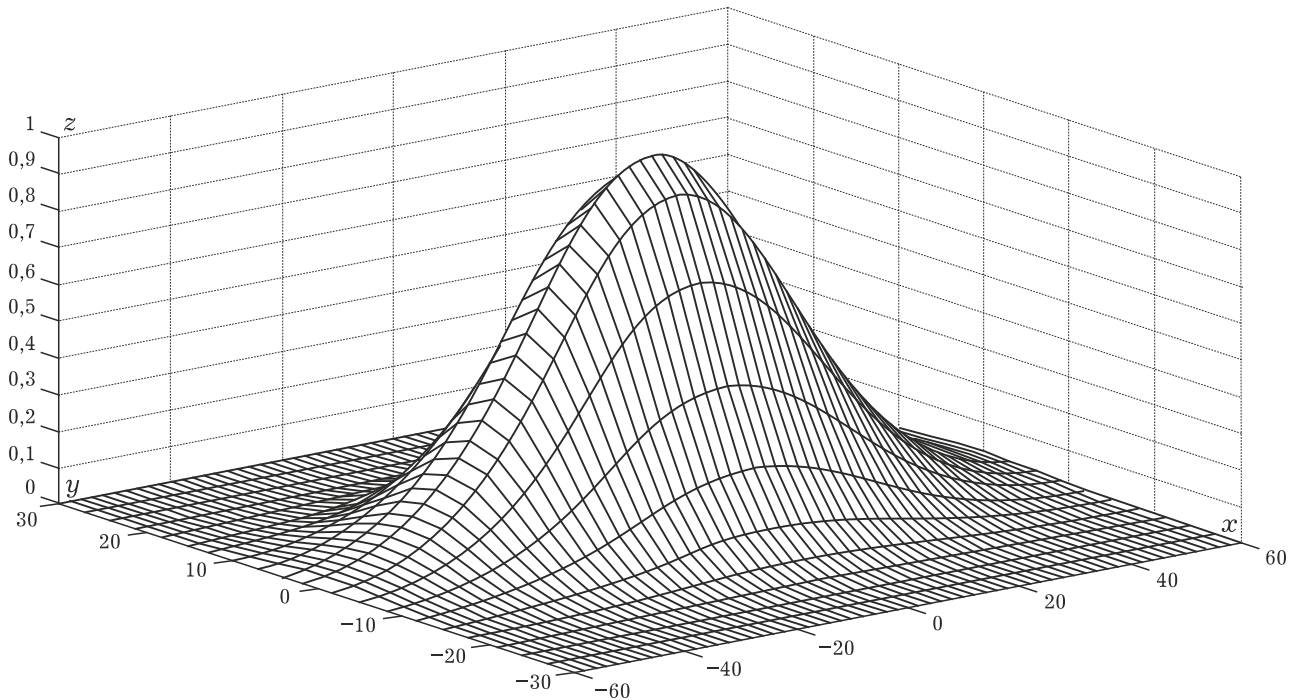
$$\left\{ \begin{aligned} & h \sum_{i=1}^N q^2(x_i, y_i) + p \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i)r(x_i, y_i) + \\ & + \alpha \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i)u(x_i, y_i) = \\ & = - \sum_{i=1}^N (f(x_i, y_i)q(x_i, y_i) - g(x_i, y_i)q(x_i, y_i)); \\ & h \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i)r(x_i, y_i) + p \sum_{i=1}^N r^2(x_i, y_i) + \\ & + \alpha \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i)u(x_i, y_i) = \\ & = - \sum_{i=1}^N (f(x_i, y_i)r(x_i, y_i) - g(x_i, y_i)r(x_i, y_i)); \\ & h \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i)u(x_i, y_i) + p \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i)u(x_i, y_i) + \\ & + \alpha \sum_{i=1}^N u^2(x_i, y_i) = \\ & = - \sum_{i=1}^N (f(x_i, y_i)u(x_i, y_i) - g(x_i, y_i)u(x_i, y_i)). \end{aligned} \right.$$

где $u(x_i, y_i) = -q(x_i, y_i)y_i + r(x_i, y_i)x_i$.

Система линейных уравнений решается относительно h, p и α .

Пример. Необходимо совместить два видеосигнала (см. рис. 1):

$$f(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{x}{30} \right)^2 - \left(\frac{y}{10} \right)^2 \right] \text{ и}$$

Рис. 1. Видеосигнал $f(x, y)$

$$g(x, y) = \exp \left[-\left(\frac{x'}{30} \right)^2 - \left(\frac{y'}{10} \right)^2 \right],$$

где

$$x'_i = x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) + h;$$

$$y'_i = x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) + p;$$

$$h = 1,5; \quad p = 1,7; \quad \alpha = 5^\circ.$$

Полагая, что аналитическая форма сигнала неизвестна, а аргументы принимают дискретные значения $x_i = -60, -58, -56, \dots, 60$; $y_i = -30, -27, -54, \dots, 30$, составляем систему уравнений. Решение системы определит следующие значения: $\hat{h} = 1,6217$; $\hat{p} = 1,6263$; $\hat{\alpha} = 4,28^\circ$. Эти значения близки к действительным.

2. Усовершенствование алгоритма

Применение ряда Тейлора приводит к увеличению погрешности оценки параметров.

Для устранения этого недостатка была разработана процедура, которая позволяет повысить точность оценки.

Суть ее заключается в следующем: после оценки параметров h , p и α видеосигнал $g(x, y)$ пересчитывается в точках $xn_i = x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) + h$, $yn_i = x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) + p$. Полученный сигнал $gn(x, y) = g(xn, yn)$ используется для сравнения с $f(x, y)$, чтобы уточнить параметры. Применяемая итерационная процедура (в работе использовалось фиксированное количество итераций, равное пяти) позволила повысить точность.

Для приведенного выше примера: $\hat{h} = 1,4744$; $\hat{p} = 1,7333$; $\hat{\alpha} = 5,27^\circ$.

Данная оценка более близка к действительным значениям параметров в сравнении с предыдущим результатом.

3. Точность совмещения видеосигналов

Для определения погрешности совмещения было проведено компьютерное моделирование. К каждому отсчету сигнала, приведенному в примере, добавлялась помеха с гауссовым распределением и заданным среднеквадратичным отклонением (СКО) σ_n .

Полученные оценки параметров совмещения сравнивались с действительными значениями. Результатом сравнения является среднеквадратичная величина (СКВ):

$$СКВ = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\hat{h} - h)^2} / L,$$

где \hat{h} – оценка параметра; h – это действительное значение; L – количество моделирований.

По результатам измерений были построены графики зависимости СКВ от мощности шума σ_n . Точность оценки совпадает с точностями оценки для алгоритмов полного перебора и корреляционного алгоритма.

Сравнение с аналогичными работами с разложением в ряд Тейлора не проводилось, так как существующие алгоритмы не позволяют опреде-

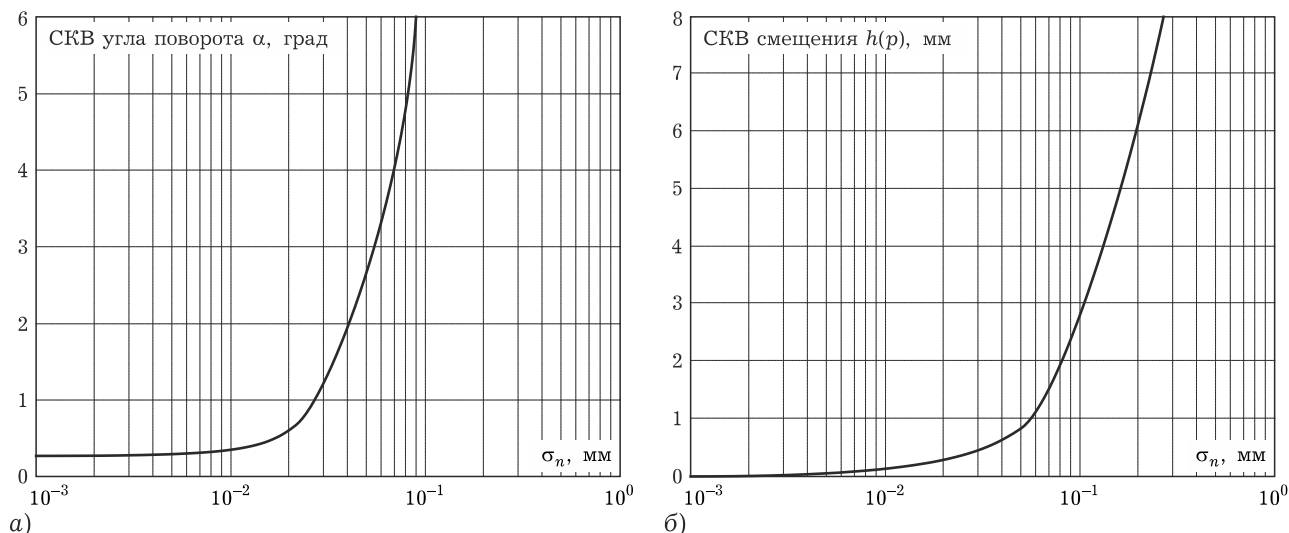


Рис. 2. Точность оценки параметров

лить смещение и угол одновременно, и оценка параметров будет содержать методические погрешности (рис. 2).

Заключение

Приведенный алгоритм оценки параметров совмещения видеосигналов является обобщением алгоритма Лукаса – Канаде и алгоритма, приведенного в работах [6; 7]. Точность оценки параметров совпадает с алгоритмами перебора.

При мощности шума $\sigma_n = 0,01$ по параметрам h/p СКВ составляет 0,2 мм, по углу поворота α составляет 0,3°. Однако скорость вычисления приблизительно в 1000 раз выше, чем у переборных алгоритмов.

Дальнейшее исследование данной задачи будет вестись в направлении обобщения параметрической модели для учета аддитивной и мультипликативной помехи, которые оказывают свое влияние на видеосигнал [12–14].

Список литературы

1. Совмещение изображений в условиях неопределенности / В.А. Андросов [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. 1985. № 4. С. 32–41.
2. Методы оценивания взаимного смещения фрагментов изображений / А.В. Губанов [и др.] // Автометрия. 1988. № 3. С. 70–73.
3. Панкова Т.Л., Резник А.Л. Эффективность алгоритмов прецизионного совмещения цифровых изображений // Автометрия. 1991. № 5. С. 39–43.
4. Liu M., Delbruck T. Block-matching optical flow for dynamic vision sensors: Algorithm and FPGA implementation // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050295>.
5. Васин Н.Н., Куринский В.Ю. Обработка видеосигналов для измерения скорости движения железнодорожных вагонов на сортировочной горке // Компьютерная оптика. 2005. № 27. С. 185–188.
6. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proc. Seventh International Conference on Artificial Intelligence. 1981. P. 674–679.
7. Lucas B.D. Generalized Image Matching by the Method of Differences. Pittsburgh. Carnegie-Melion University publisher. 1984.
8. Horn B.K., Schunck B.G. Determining optical flow // Artificial Intell. 1981. Vol. 17. P. 185–204. DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(81\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2).
9. High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Wrapping / T. Brox [et al.] // ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science. 2004. Vol. 3024. P. 25–36. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24673-2_3.
10. Мачнев А.М., Жук С.Я. Беспойсковый алгоритм определения угла поворота изображений // Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2008. № 37. С. 33–37.
11. Мачнев А.М. Беспойсковый алгоритм определения угла поворота изображений // Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2010. № 42. С. 40–45.
12. Ташлинский А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений / Ульяновский государственный технический университет. Ульяновск: УлГТУ. 2000. 132 с.
13. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка информационных параметров сигнала на фоне аддитивно-мультипликативных помех с произвольным распределением // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. № 4. Т. 21. С. 58–62.

14. Диязитдинов Р.Р. Методы различения и оценки параметров оптических сигналов: монография. Самара: ПГУТИ, 2019. 139 с.

References

- Androsov V.A. [et al.] Sovmeschenie izobrazhenij v usloviyah neopredelennosti [Combination of images in the conditions of uncertainty]. *Zarubezhnaja radioelektronika* [Foreign radio electronics], 1985, no. 4, pp. 32–41 [in Russian].
- Gubanov A.V. [et al.] Metody otsenivaniya vzaimnogo smeschenija fragmentov izobrazhenij [Methods for estimating the relative displacement of image fragments]. *Avtometrija* [Autometry], 1988, no. 3, pp. 70–73 [in Russian].
- Pankova T.L., Reznik A.L. Effektivnost' algoritmov pretsizionnogo sovmeschenija tsifrovyyh izobrazhenij [Efficiency of precision digital imaging algorithms]. *Avtometrija* [Autometry], 1991, no. 5, pp. 39–43 [in Russian].
- Liu M., Delbruck T. Block-matching optical flow for dynamic vision sensors: Algorithm and FPGA implementation. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2017, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050295> [in English].
- Vasin N.N., Kurinskij V.Ju. Obrabotka videosignalov dlja izmerenija skorosti dvizhenija zheleznodorozhnyh vagonov na sortirovochnoj gorke [Processing video signals to measure the speed of rail cars on the hump]. *Komp'yuternaja optika* [Computer optics], 2005, no. 27, pp. 185–188 [in Russian].
- Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, pp. 674–679 [in English].
- Lucas B.D. Generalized Image Matching by the Method of Differences. Pittsburgh: Carnegie-Melion University publisher, 1984 [in English].
- Horn B.K., Schunck B.G. Determining optical flow. *Artificial Intell.*, 1981, vol. 17, pp. 185–204. DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(81\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2) [in English].
- Brox T. [et al.] High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Wrapping. *ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science*, 2004, vol. 3024, pp. 25–36. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24673-2_3 [in English].
- Machnev A.M., Zhuk S.Ja. Bespoiskovyj algoritm opredelenija ugla povorota izobrazhenij [Search algorithm for determining the angle of rotation of images]. *Visnik Natsional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini Kiiv'skij politehničnij institut. Serija: Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine Kiiv Polytechnic Institute. Seriya: Radiotekhnika. Radioparatobuduvannja], 2008, no. 37, pp. 33–37 [in Russian].
- Machnev A.M. Bespoiskovyj algoritm opredelenija ugla povorota izobrazhenij [Search algorithm for determining the angle of rotation of images]. *Visnik Natsional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini Kiiv'skij politehničnij institut. Serija: Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine Kiiv Polytechnic Institute. Seriya: Radiotekhnika. Radioparatobuduvannja], 2010, no. 42, pp. 40–45 [in Russian].
- Tashlinskij A.G. [et al.] Otsenivanie parametrov prostranstvennyh deformatsij posledovatel'nostej izobrazhenij [Estimation of spatial deformation parameters of image sequences]. Ulianovsk: UIGTU, 2000, 132 p. [in Russian].
- Artjushenko V.M., Volovach V.I. Otsenka informatsionnyh parametrov signala na fone additivno-mul'tiplikativnyh pomeh s proizvol'nym raspredeleniem [Evaluation of the information parameters of the signal on the background of additive-multiplicative interference with an arbitrary distribution]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Wave process physics and radio systems], 2018, no. 4, pp. 58–62 [in Russian].
- Dijazitdinov R.R. Metody razlichenija i otsenki parametrov opticheskikh signalov: monografija [Methods for distinguishing and evaluating the parameters of optical signals: monograph]. Samara: PGUTI, 2019, 139 p. [in Russian].

Offset and rotate measurement for video signal superposition

R.R. Diyazitdinov

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street
Samara, 443010, Russian Federation

In this article the task offset and rotate measurement for video signal superposition was described. The developed algorithm is generalization of Lucas–Kanade model. Another name of this model is optical flow algorithm. The original algorithm allows to rate offsets parameters, but developed algorithm also allows to rate rotate angle. The concept of superposition has based on Taylor series of signal and sinus and cosines replacement on approximate function.

Keywords: video signal superposition, offset and rotate measurement, optical flow, full-scan algorithm, correlation algorithm, Lucas–Kanade's algorithm.