

Новый алгоритм определения 3D координат центра роговицы глаза в системе бесконтактного айтрекинга

Г.И. Громили
Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
gromilin@iae.nsk.su

В.П. Косых
Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
kosych@iae.nsk.su

Н.С. Яковенко
Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
YakovenkoNS@iae.nsk.su

Аннотация—В ряде систем бесконтактного слежения за направлением взгляда по видеоданным, формируемым видеокамерой, удаленной от головы клиента, взаимное положение камеры и глаз клиента определяется по бликам, создаваемым на роговице глаз точечными источниками ИК излучения, жестко связанными с камерой. В работе предлагается новый алгоритм оценивания трехмерных координат центра роговицы по изображениям бликов от пары точечных источников излучения. Показано, что при расстоянии между глазом и камерой, значительно превышающем радиус роговицы, задача сводится к решению одного нелинейного уравнения, получаемому посредством быстро сходящейся итерационной процедуры. Приводятся результаты численного эксперимента, подтверждающего сохранение точности оценок.

Ключевые слова— бесконтактное определение направления взгляда, блики, координаты центра роговицы, трехмерная модель глаза.

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы бесконтактного айтрекинга, т.е. слежения за направлением взгляда пользователя, находят разнообразное применение в различных областях нашей деятельности. Широкое распространение получила, например, линейка устройств Tobii Eye Tracker шведской фирмы Tobii [1], применяемая как в компьютерных играх, так и в качестве средства взаимодействия с компьютером пользователей с ограниченными физическими возможностями. Известны работы по привлечению систем бесконтактного айтрекинга к управлению различными подвижными механизмами [2], к контролю зрительного внимания водителя автомобиля [3], [4]. В маркетинге при разработке эффективных методов продвижения товаров с их помощью изучается порядок осмотра витрин покупателем [5], в психологии – характер движения глаз как результат влияния на поведение человека различных стрессовых ситуаций [6].

Основными элементами системы бесконтактного айтрекинга являются видеокамера, формирующая последовательность изображений лица клиента, и программно-алгоритмическое обеспечение, назначение которого заключается в выделении в изображении зрачков и определении по тем или иным признакам направления взгляда. Как правило, направление взгляда оценивается по положению центра зрачка относительно некоторых реперных меток, привязанных к системе координат камеры. Реперные метки в большинстве систем создаются искусственно точечными источниками инфракрасного (ИК) излучения, жестко связанными с видеокамерой и создающими блики на поверхности роговицы глаза.

Положение центра зрачка относительно этих бликов несет информацию об изменении направления взгляда. Методы определения направления взгляда по взаимному положению центра зрачка и бликов условно можно разделить на два класса. К первому относятся регрессионные методы, использующие эмпирически устанавливаемую в процессе калибровки зависимость между смещением зрачка относительно бликов и известным направлением взгляда [7]. Ко второму – методы, опирающиеся на трехмерную (3D) модель глаза. В методах, основанных на трехмерной модели глаза [8], направление взгляда вычисляется по трехмерным координатам центра роговицы глаза и центра зрачка, связанных соотношениями, установленными в модели «схематического глаза» Гульстранда [9].

2. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ 3D КООРДИНАТ ЦЕНТРА РОГОВИЦЫ ГЛАЗА

В ряде публикаций, посвященных бесконтактным системам определения направления взгляда, отмечается, что регрессионные методы, использующие только двумерную информацию о взаимном положении изображений центра зрачка и опорного блика, чрезвычайно чувствительны к изменению положения головы оператора по отношению к положению в момент калибровки [8], [10]. Методы, основанные на 3D модели глаза, дают более стабильную оценку направления взгляда при перемещении головы в пределах нескольких сантиметров как по дальности, так и в плоскости, ортогональной оптической оси камеры. Однако они требуют применения как минимум двух пространственно разнесенных источников реперных бликов и алгоритмов для оценивания 3D координат центра роговицы и зрачка. Первым этапом реализации этих методов является вычисление 3D координат центра роговицы по координатам изображений бликов от реперных источников. Оригинальный алгоритм вычисления координат центра роговицы по изображениям двух бликов, основанный на решении системы трансцендентных уравнений, был предложен авторами работы [10]. Система опирается на модель глаза [9], в которой поверхность роговицы аппроксимируется сферой. В нашей работе предложен более простой алгоритм решения этой задачи.

На рисунке 1 приведена схема формирования изображений бликов от двух пространственно разнесенных источников, отраженных сферической поверхностью роговицы глаза, в плоскости сенсора камеры. Здесь $OXYZ$ – система координат камеры, а P – плоскость ее сенсора.

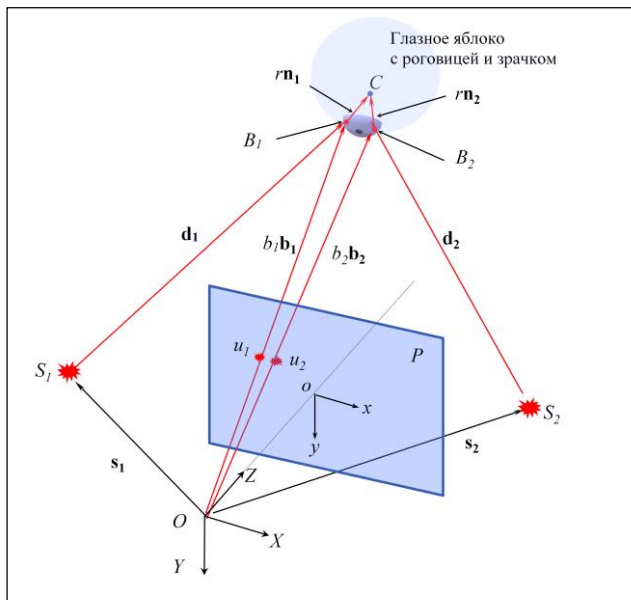


Рис. 1. Схема формирования изображений бликов

Начало системы координат камеры совмещено с оптическим центром объектива O , а ось OZ – с его оптической осью. Точечные источники ИК излучения, создающие опорные блики, находятся в точках S_1 и S_2 , центр сферы радиуса r , аппроксимирующей поверхность роговицы – в точке C . Излучение от источников создает блики на роговице в точках B_1 и B_2 , их изображения u_1 и u_2 формируются в плоскости P . Единичные векторы нормалей к сферической поверхности роговицы в точках бликов обозначены \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 . Положение источников задано конструкцией системы айтрекинга и определяется векторами \mathbf{s}_1 и \mathbf{s}_2 , а направление на блики задается единичными векторами \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 , которые определяются двумерными координатами изображений бликов u_1 и u_2 .

Как следует из рисунка, векторы источников бликов \mathbf{s}_i , направления падающего на роговицу \mathbf{d}_i и отраженного в объектив камеры \mathbf{b}_i лучей связаны соотношением

$$\mathbf{d}_i = b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где b_i – расстояние от оптического центра объектива камеры до i -го блика на роговице. Показано, что нормаль \mathbf{n}_i к поверхности в точке отражения луча B_i и векторы \mathbf{b}_i и \mathbf{s}_i удовлетворяют условию:

$$\mathbf{n}_i = (|b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i| \mathbf{b}_i + b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i) / \|\mathbf{b}_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i\| \|\mathbf{b}_i + b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i\|. \quad (2)$$

С другой стороны, нормаль к сферической поверхности роговицы направлена в центр сферы, поэтому:

$$\mathbf{c} = b_1 \mathbf{b}_1 + r \mathbf{n}_1 = b_2 \mathbf{b}_2 + r \mathbf{n}_2, \quad (3)$$

где r – радиус роговицы. Из соотношения (3) следует нелинейное векторное уравнение относительно двух неизвестных, b_1 и b_2 :

$$b_1 \mathbf{b}_1 - b_2 \mathbf{b}_2 + r(\mathbf{n}_1(b_1) - \mathbf{n}_2(b_2)) = \mathbf{0}, \quad (4)$$

для решения которого можно воспользоваться методом наименьших квадратов (МНК).

Если расстояние от камеры до глаза значительно превышает радиус роговицы, можно положить $b_1 = b_2 = b$ и из (4) получить уравнение (5)

$$b(\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2) + r(\mathbf{n}_1(b) - \mathbf{n}_2(b)) = \mathbf{0}. \quad (5)$$

Его МНК-решение \tilde{b} получается в результате итерационной процедуры и позволяет вычислить 3D координаты точки C :

$$\mathbf{c} = \sum_{i=1,2} [\tilde{b} \mathbf{b}_i + r(\tilde{b} \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i) \mathbf{b}_i + \tilde{b} \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i] / \|\tilde{b} \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i\| \|\mathbf{b}_i + \tilde{b} \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i\| / 2] \quad (6)$$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм был проверен посредством моделирования хода лучей от пары точечных источников излучения, отраженных имитирующей роговицу зеркальной сферой радиусом $r = 7.5$ мм в объектив камеры, формирующий изображения бликов в плоскости сенсора P . В системе координат камеры (все координаты указаны в мм) источники излучения размещались в точках $S_1(-120, 0, 0)$ и $S_2(120, 0, 0)$, центр сферы – в точке $C(0, 0, 480)$, т.е. расстояние от оптического центра камеры до поверхности сферы более чем в 60 раз превышало ее радиус. Формат сенсора камеры – 1280×1024 пикселей, размер пикселя – $0,0053 \times 0,0053$ мм², фокусное расстояние объектива – 25 мм. Координаты изображений бликов измерялись с ошибками, независимо распределенными вдоль осей ox и oy по нормальному закону с СКО 1 пикс. По 500 реализациям измерений координат изображений бликов среднеквадратичные ошибки МНК-оценок координат центра роговицы составили: по осям X и Y – 0.1 мм, по оси Z – 17.7 мм. Для решения уравнения (4) требовалось не менее 10 итераций, тогда как решение уравнения (5) получалось не более чем за 5 итераций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект 121022000116-0).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: <https://gaming.tobii.com> (21/02/2022).
- [2] Eid, M.A. A novel eye-gaze-controlled wheelchair system for navigating unknown environments: case study with a person with ALS / M.A. Eid, N. Giakoumidis, A. El Saddik // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 558-573. DOI:10.1109/ACCESS.2016.2520093.
- [3] Said, Sh. Real Time Eye Tracking and Detection- A Driving Assistance System / Sh. Said, S. AlKork, T. Beyrouthy, M. Hassan, O.E. Abdellatif, M.F. Abdraboo // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2018. – Vol. 3(6). – P. 446-454.
- [4] Nguyen, T.P. Eye tracking system to detect driver drowsiness / T.P. Nguyen, M.T. Chew, S. Demidenko // 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). – 2015. – P. 472-477. DOI: 10.1109/ICARA.2015.7081194.
- [5] Chandon, P. Measuring the Value of Point-of-Purchase Marketing with Commercial Eye-Tracking Data / P. Chandon, J.W. Hutchinson, E.T. Bradlow, S.H. Young // INSEAD Business School Research. – 2007. – P. 46.
- [6] Барabanщиков, В.А. Айтрекинг в психологической науке и практике / В.А. Барabanщиков. – М.: Когито-Центр, 2015. – 410 с.
- [7] Cherif, Z. An adaptive calibration of an infrared light device used for gaze tracking / Z. Cherif, A. Nait-Ali, J. Motsch, M. Krebs // Proc. 19th IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. – 2002. – Vol. 2. – P. 1029-1033.
- [8] Hennessey, C. A Single Camera Eye-Gaze Tracking System with Free Head Motion / C. Hennessey, B. Noureddin, P. Lawrence // Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications. – 2006. – P. 87-94. DOI: 10.1145/1117309.1117349.
- [9] Goss, D.A. Introduction to the Optics of the Eye / D.A. Goss, R.W. West. – Boston, MA: Butterworth Heinemann, 2001. – 252 p.
- [10] Shih, S. A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras / S. Shih, J. Liu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B. – 2004. – Vol. 34(1). – P. 234-245.