

УДК 62.506.2

С. Ф. КАЦАЛАП

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОТОБРАЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Существенное место в проблеме создания отображающих устройств занимает разработка устройств отображения, способных отличать различные виды механического движения объектов и вычислять их основные параметры. Если учесть, что нейронные структуры зрительного анализатора обладают некоторыми из этих способностей (1, 2), то при решении поставленной задачи можно воспользоваться результатами исследования их функциональных и структурных свойств. Математические модели функциональных свойств нейронных структур зрительного анализатора, предпочтительно реагирующих на движение стимула (объекта), а также на движение стимула в определенном направлении, описаны в работе [3]. Эти модели соответствуют нелинейным дифференциальным операторам, определяющим скорость движения стимула и ее проекции на координатные оси. В настоящем сообщении по данным [3] получены нелинейные дифференциальные операторы, выделяющие некоторые другие особенности поступательного движения стимула, а также оператор, выделяющий вращательное движение стимула.

Однако нелинейные дифференциальные операторы являются детекторами соответствующих свойств лишь для точек, лежащих в области существования входных сигналов, на границах же

областей они могут принимать другие значения. Поэтому для отделения граничных значений выходных сигналов необходимы соответствующие преобразования, которые целесообразно определять при решении конкретной технической задачи.

В зрительной системе мухи [2] обнаружены нейронные структуры интегративного типа. Некоторые из них обладают максимальной реакцией при движении стимула по окружности вокруг определяемого центра. Функциональные свойства таких структур можно формально описать следующим образом.

Если размеры стимула во много раз меньше радиуса окружности, то такое движение можно считать поступательным. Поэтому, рассматривая положение стимула в прямоугольной системе координат для некоторого момента времени, проведем через стимул окружность, центр которой лежит в начале координат (рис. 1). По проекциям скорости на координатные оси можно определить две другие проекции скорости на ортогональные прямые, направленные по касательной к окружности и нормали (радиусу), проектируя две проекции на направление последних:

$$v_k = -\frac{\partial S_1}{\partial t} \sin \alpha + \frac{\partial S_2}{\partial t} \cos \alpha; \quad (1)$$

$$v_n = -\frac{\partial S_1}{\partial t} \cos \alpha + \frac{\partial S_2}{\partial t} \sin \alpha, \quad (2)$$

где $\frac{\partial S_1}{\partial t}$ и $\frac{\partial S_2}{\partial t}$ определены в работе [3]:

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = \frac{\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y}}{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y}}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = \frac{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}}{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}}; \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad \sin \alpha = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (5)$$

Подставляя (3), (4), (5) в (1), (2), получаем

$$v_k = \frac{\left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right) x - y \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right)}{\left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right) \sqrt{x^2 + y^2}}; \quad (6)$$

$$v_n = \frac{\left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right) x + y \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right)}{\left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y}\right) \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (7)$$

Оператор (6), определяющий касательную составляющую скорости, принимает максимальное по модулю значение при движе-

нии стимула по окружности, центр которой лежит в начале координат, и минимальное — при прямолинейном движении стимула в радиальном направлении. В случае движения стимула по направлению вращения часовой стрелки (6) принимает положительное значение, а при движении в обратном направлении — отрицательное.

Противоположными свойствами обладает оператор (7), определяющий нормальную составляющую скорости. Он принимает максимальное значение по модулю при движении его по окружности. Если движущийся стимул удаляется от центра, то (7) принимает положительное значение. Если же движение вызывает приближение стимула к центру, то (7) принимает отрицательное значение.

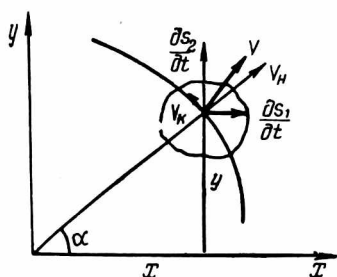


Рис. 1.

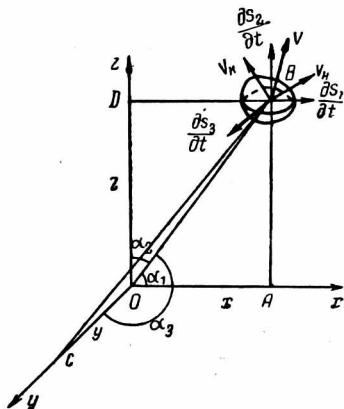


Рис. 2.

Если нет необходимости измерять v_k и v_n , а требуется лишь выделить движение стимула по окружности либо его радиальное движение, то для этих целей достаточно воспользоваться операторами числителей выражений (6) и (7):

$$\begin{aligned} (5) \quad R_k &= x \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) - y \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(x \frac{\partial I}{\partial x} + y \frac{\partial I}{\partial y} \right) - \frac{\partial I}{\partial t} \left(x \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + y \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} (6) \quad R_n &= x \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + y \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) = \\ &= \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(y \frac{\partial I}{\partial x} - x \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left(x \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - y \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

(7) Найдем аналогичные операторы для движения небольшого объекта в пространстве (рис. 2). На рис. 2 изображено некоторое положение движущегося объекта в трехмерной декартовой системе координат. Через точку объекта B мысленно проведена сфера, центр которой совпадает с началом координат; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы,

образованные радиусом сферы и координатными осями; $\frac{\partial S_1}{\partial t}$, $\frac{\partial S_2}{\partial t}$, $\frac{\partial S_3}{\partial t}$ — проекции скорости на координатные оси; v_n — проекция v на направление пересечения касательной к сфере в точке B плоскостью, образованной v_n и v .

Проектируя $\frac{\partial S_1}{\partial t}$, $\frac{\partial S_2}{\partial t}$ и $\frac{\partial S_3}{\partial t}$ на радиальное направление в точке B , находим нормальную составляющую скорости, учитывая которую можно определить касательную составляющую скорости:

$$v_n = \frac{\partial S_1}{\partial t} \cos \alpha_1 + \frac{\partial S_2}{\partial t} \cos \alpha_2 + \frac{\partial S_3}{\partial t} \cos \alpha_3; \quad (10)$$

$$v_n = \left| \sqrt{v^2 - \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \cos \alpha_1 + \frac{\partial S_2}{\partial t} \cos \alpha_2 + \frac{\partial S_3}{\partial t} \cos \alpha_3 \right)^2} \right|, \quad (11)$$

$$v^2 = \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t} \right)^2. \quad (12)$$

Решая систему уравнений, приведенную в работе [3], можно получить значения

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = \frac{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial z} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)}{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = \frac{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial z} - \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial z} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)}{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial t} = \frac{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}; \quad (15)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}},$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (16)$$

При радиальном движении объекта (10) принимает максимальное по модулю значение, а при движении по поверхности сферы — минимальное. Если объект удаляется от центра сферы, то (10) принимает положительное значение. В противном случае, т. е. при приближении объекта к центру сферы, (10) принимает отрицательное значение. Противоположными свойствами обладает оператор (11), максимальное положительное значение которого вызывает движение объекта по поверхности сферы, а минимальное соответствует радиальному движению объекта.

Детектирование отклонений от прямолинейных и равномерных движений

Учитывая (3), (4), можно получить детектор, реагирующий на отклонения от прямолинейного движения стимула:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t}\right)^2}. \quad (17)$$

При прямолинейном движении отношение между проекциями скоростей на координатные оси является постоянным, поэтому (17) принимает нулевое значение.

С учетом (13)—(15) получим операторы, реагирующие на отклонения от движения в плоскостях, перпендикулярных к плоскости *хоу*, а также в плоскостях, перпендикулярных к плоскости *хоз*:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t}\right)^2}; \quad (18)$$

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t}\right)^2}. \quad (19)$$

Принимая во внимание (19), (18), можно получить оператор, реагирующий на отклонение от прямолинейного движения объекта в пространстве:

$$R = \left| \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t}\right)^2} \right| + \left| \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t}\right)^2} \right|. \quad (20)$$

В одномерной модели оператор, реагирующий на изменение скорости движения объекта, соответствует ускорению движения.

Поэтому, учитывая оператор, определяющий скорость движения [3], можно вычислить ускорение:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial x} \right). \quad (21)$$

Операторы, определяющие проекции скорости на координатные оси в двумерной — (3), (4) — и трехмерной — (13), (14), (15) — моделях позволяют получить соответствующие операторы, реагирующие на отклонение от равномерного движения:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t} \right)^2 \right], \quad (22)$$

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t} \right)^2 \right]. \quad (23)$$

Детектирование вращательного движения

Стимулу, совершающему произвольное движение в плоскости, можно поставить в соответствие входной сигнал $I [x \cos \varphi(t) - y \sin \varphi(t) + S_1(t), x \sin \varphi(t) + y \cos \varphi(t) + S_2(t)]$, заданный на некоторой области

$$\Phi [x \cos \varphi(t) - y \sin \varphi(t) + S_1(t), x \sin \varphi(t) + y \cos \varphi(t) + S_2(t)],$$

где $\varphi(t)$ определяет вращательное движение стимула, а $S_1(t)$ и $S_2(t)$ — его поступательное движение.

Продифференцируем входной сигнал по времени:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} = & \frac{\partial I}{\partial x_1} \left(-x \sin \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} - y \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial S_1}{\partial t} \right) + \\ & + \frac{\partial I}{\partial y_1} \left(x \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} - y \sin \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial S_2}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$x_1 = x \cos \varphi - y \sin \varphi + S_1;$$

$$y_1 = x \sin \varphi + y \cos \varphi + S_2.$$

Дифференцируя входной сигнал по переменным x и y , получаем

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \frac{\partial I}{\partial x_1} \cos \varphi + \frac{\partial I}{\partial y_1} \sin \varphi; \quad (25)$$

$$\frac{\partial I}{\partial y} = -\frac{\partial I}{\partial x_1} \sin \varphi + \frac{\partial I}{\partial y_1} \cos \varphi. \quad (26)$$

Из системы уравнений (25), (26) находим

$$\frac{\partial I}{\partial x_1} = \frac{\partial I}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial I}{\partial y} \sin \varphi; \quad (27)$$

$$\frac{\partial I}{\partial y_1} = \frac{\partial I}{\partial x} \sin \varphi + \frac{\partial I}{\partial y} \cos \varphi. \quad (28)$$

Подставляя (27), (28) в (25) и выполняя соответствующие преобразования, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \left(-y \frac{\partial I}{\partial x} + x \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial S_1}{\partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial I}{\partial y} \sin \varphi \right) + \\ + \frac{\partial S_2}{\partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \sin \varphi + \frac{\partial I}{\partial y} \cos \varphi \right). \end{aligned} \quad (29)$$

Дифференцируя (29) по переменным x и y , имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} = - \left(y \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial I}{\partial y} + x \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \cos \varphi - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \sin \varphi \right) \frac{\partial S_1}{\partial t} + \\ + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \sin \varphi + \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \cos \varphi \right) \frac{\partial S_2}{\partial t}; \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial y} = \left(-\frac{\partial I}{\partial x} - y \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} + x \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \cos \varphi - \right. \\ \left. - \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \sin \varphi \right) \frac{\partial S_1}{\partial t} + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \sin \varphi + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \cos \varphi \right) \frac{\partial S_2}{\partial t}. \end{aligned} \quad (31)$$

Решая совместно систему уравнений (29), (30) и (31), определяем угловую скорость вращения стимула:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} \left[\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) + \\ + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\quad}{-\frac{\partial I}{\partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial I}{\partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Оператор (32) не зависит от параметров $S_1(t)$ и $S_2(t)$. Следовательно, он не реагирует на поступательное движение стимула. Оператор (32), как и (4), при вращении стимула за часовой стрелкой принимает положительное значение, а при вращении его в противоположном направлении — отрицательное. Однако если (4) позволяет выделять вращательное движение только небольших объектов, вращающихся вокруг определенного центра, удаленного на большое расстояние от самого объекта, то (32) позволяет определять вращение независимо от положения его центра и размеров объекта.

Если нет необходимости измерять угловую скорость вращательного движения стимула, а требуется лишь детектировать его вращение, то для этой цели достаточно воспользоваться оператором числителя (32):

$$\begin{aligned} R = \frac{\partial I}{\partial t} \left[\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) + \\ + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (33)$$

Оператор (33) также является числителем выражения (15) для $\frac{\partial S_3}{\partial t}$, поэтому он тождествен детектору, реагирующему при поступательном движении в пространстве на движение стимула, направленное по оси oz (3). Следовательно, один и тот же оператор в зависимости от рассматриваемых входных сигналов может детектировать различные их свойства.

Таким образом, полученные в данной работе результаты позволяют формировать некоторые функции нейронных структур зрительного анализатора, указывают на пути использования существующих операторов для дальнейшего анализа пространственно-временных сигналов, дают возможность подойти к разработке соответствующих технических анализаторов сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костелянец Н. Б., Левушина Е. И. Восприятие движения. — В кн.: Физиология сенсорных систем. Ч. 1-я. Физиология зрения. М., «Наука», 1971, с. 304—318.
2. Mimura K. Movement Discrimination by the Visual System of Flies. — «Zeitschrift für Vergleichende Physiologie», 1971, Bd 73 H2, S. 105—138.
3. Кацалап С. Ф. Математическое исследование функциональных свойств нейронных структур, чувствительных к движению. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков, «Вища школа», 1974, с. 30—36.