Р О С С И Й С К А Я   А К А Д Е М И Я   Н А У К

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

№ 4 1999

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.31.05.721.397.62

Р. К. Мамедов

(Баку, Азербайджан)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ МЕРЫ БЛИЗОСТИ КАМБЕРРА МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ОБРАЗОВ

Рассматривается модель процесса оценки меры близости между объектами и полученных погрешностей. Предлагаются условия и алгоритм минимизации этих погрешностей, и рекомендуются меры для повышения точности оценки меры близости между объектами.

Расстояние Камберра нашло широкое применение в различных областях науки и техники для вычисления расстояния между двумя точками, представленными в виде координат в ортогональной системе [1]. В распознавании образов его используют для вычисления меры близости между объектами (МБМО), представленными в виде числовых значений их признаков [2]. Эти значения находятся путем измерения и содержат аддитивные, мультипликативные и случайные погрешности. Поэтому итоговое значение МБМО также содержит ошибки, для минимизации которых необходимо анализировать формулу расстояния Камберра и внести соответствующие изменения в алгоритм вычисления МБМО.

Предположим, что каждые измеренные значения параметров распознаваемого и эталонного объектов представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i,\,\text{д}}(1 + \gamma_{i,\,x})K_{i,\,x} + \Delta x_i, \\ y_i &= y_{i,\,\text{д}}(1 + \gamma_{i,\,y})K_{i,\,y} + \Delta y_i, \end{aligned} \tag{1}$$

где $x_{i,\,\text{д}}$ и $y_{i,\,\text{д}}$ – действительные значения параметров входного и эталонного объектов; $K_{i,\,x}$ и $K_{i,\,y}$ – коэффициенты преобразования входного параметра в код признаков распознаваемого и эталонного объектов; $\gamma_{i,\,x}$ и $\gamma_{i,\,y}$ – относительные погрешности измерения параметров x_i и y_i; Δx_i и Δy_i – аддитивные погрешности измерения значений параметров распознаваемого и эталонного объектов.

Анализ расстояния Камберра показал, что аддитивные погрешности оценки МБМО выражаются в следующем виде:

$$\Delta z_{i,\,\text{ад}} = \frac{\Delta x_i \operatorname{sign}(\Delta x_i) - \Delta y_i \operatorname{sign}(\Delta y_i)}{x_i + y_i + \Delta x_i + \Delta y_i}, \tag{2}$$

где $\operatorname{sign}(\Delta x_i)$ и $\operatorname{sign}(\Delta y_i)$ − полярности аддитивных погрешностей измерения параметров x и y.

Анализ этого выражения позволяет получить формулу изменения аддитивной погрешности оценки значения МБМО в зависимости от изменения абсолютных значений аддитивных погрешностей измерения значений признаков объектов:

$$\frac{d\Delta_{\text{ад}}}{d\alpha} = \frac{(x_i + y_i)}{(x_i + y_i + \alpha)^2}, \tag{3}$$

где $\alpha = \Delta x_i \operatorname{sign}(\Delta x_i) - \Delta y_i \operatorname{sign}(\Delta y_i)$.

Из выражения (3) видно, что в отличие от формул Манхеттена и Эвклида в этой формуле производные скорости нарастания аддитивной погрешности оценки МБМО получают отрицательные значения.

Кроме того, абсолютные значения аддитивных погрешностей оценки МБМО обратно пропорциональны сумме значений данного признака распознаваемого и эталонного объектов, что в конечном итоге мало действует на значение МБМО.

Для минимизации погрешностей оценки МБМО необходимо дифференцировать общее выражение расстояния Камберра:

$$dz_i = \frac{dz_i}{dx_i}dx_i + \frac{dz_i}{dy_i}dy_i = \delta\frac{2y_i}{(x_i + y_i)^2}dx_i + \delta\frac{2x_i}{(x_i + y_i)^2}dy_i, \tag{4}$$

где $\delta = \operatorname{sign}\left(\frac{x_i - y_i}{x_i + y_i}\right)$.

После подстановки выражений для x_i и y_i в формулу (4) и соответствующих преобразований получим выражения для оценки мультипликативных погрешностей оценки МБМО:

$$\Delta z_{i,\,\text{мул}} = 2(x_i - y_i)^{-2}[y_i x_{i,\,\text{д}}(1 + \gamma_{i,\,x})\Delta K_{i,\,x} +$$

$$+ x_{i,\,\text{д}} K_{i,\,x}\Delta\gamma_{i,\,x} y_i - x_i y_{i,\,\text{д}}(1 + \gamma_{i,\,y})\Delta K_{i,\,y} - y_{i,\,\text{д}} K_{i,\,y}\Delta\gamma_{i,\,y} x_i]. \tag{5}$$

Анализ этой формулы при условиях $x_i = y_i$ показывает, что

$$\Delta z = (\gamma_{i,\,x} + \gamma_{i,\,y})/2.$$

Это означает, что МБМО, вычисленная по формуле Камберра, обладает большей точностью в режиме совпадения масштабов распознаваемого и эталонного объектов. Таким образом, чувствительность МБМО к значениям погрешностей измерения параметров распознаваемого и эталонного объектов в зависимости от уменьшения разности этих погрешностей значительно уменьшается.

Эксперименты показали, что случайные погрешности оценки МБМО оцениваются как среднеквадратическая сумма погрешностей σ_x и σ_y измерений x_i и y_i при отсутствии корреляции между ними [3].

Анализ формул (1)–(5) показывает, что для минимизации погрешностей оценки МБМО должны выполняться следующие условия.

Для постоянных составляющих систематической погрешности:

$$\Delta x_i = \Delta y_i = \min, \qquad \mathrm{sign}(\Delta x_i) = \mathrm{sign}(\Delta y_i). \tag{6}$$

Для переменных составляющих систематической погрешности:

$$\begin{gathered} \frac{\Delta K_{i,y}}{\gamma_{i,x}} = \frac{\Delta K_{i,x}}{\gamma_{i,y}}, \\ \frac{\Delta\gamma_{i,x}}{K_{i,y}} = \frac{\Delta\gamma_{i,y}}{K_{i,x}}. \end{gathered} \tag{7}$$

Из этого следует, что

$$\frac{\delta_{K_{i,y}}}{\delta_{K_{i,x}}} = \frac{\delta_{\gamma_{i,y}}}{\delta_{\gamma_{i,x}}}, \tag{8}$$

где $\delta_{K_{i,y}}$, $\delta_{K_{i,x}}$, $\delta_{\gamma_{i,y}}$ и $\delta_{\gamma_{i,x}}$ – относительные значения изменений значений K и γ.

Для случайных погрешностей

$$\begin{gathered} \sigma_x = \sigma_y = \min, \\ \mathrm{sign}(\sigma_x) = \mathrm{sign}(\sigma_y) \quad \text{или} \quad \rho = 1. \end{gathered} \tag{9}$$

Как видно из этих условий, для расстояния Камберра по сравнению с другими формулами наиболее неблагоприятными являются переменные составляющие систематической погрешности оценки МБМО. Поэтому необходимо разработать специальный алгоритм обработки результатов оценки МБМО с целью их минимизации.

При оценке МБМО по формуле Камберра должны быть соблюдены некоторые соотношения между соседними элементами массивов параметров распознаваемого и эталонного образов.

При условии, что $x_{i,\text{д}} = y_{i,\text{д}}$ для получения $z = 0$, погрешности измерения значений признаков объектов должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\gamma_{1,x} + \gamma_{2,x} + \ldots + \gamma_{k,x} = \gamma_{1,y} + \gamma_{2,y} + \ldots + \gamma_{k,y}. \tag{10}$$

Это означает, что для минимизации погрешностей оценки МБМО сумма погрешностей измерения параметров распознаваемого и эталонного объектов должна быть равной.

Данным выражением можно контролировать допускаемые погрешности измерения значений параметров распознаваемого объекта. Для этого перед работой вместо распознаваемого объекта необходимо поставить эталонный объект и добиться выполнения условия (10).

Выполнение этих условий позволяет минимизировать оцениваемую погрешность нахождения МБМО.

Для проверки теоретических исследований и предложенного алгоритма проведены экспериментальные исследования на примере систем технического зрения бинарных двумерных изображений, и полученные результаты обработаны с помощью ЭВМ.

МБМО оценивалась по следующему алгоритму. На первом этапе работы алгоритма на основе данных исходных массивов формируется массив значений $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$. На втором этапе определяются математические ожидания m_z и среднеквадратическое значение отклонения элементов этого массива σ_z. На основе этих данных формируется новый массив $\{A_i\}$, учитывающий предложенные условия инвариантности, элементы которого определяются по следующим правилам:

$$\text{если} \quad x_i < m_z, \quad \text{то} \quad A_i = m_z, \tag{11}$$

$$\text{если} \quad x_i > m_z, \quad \text{то} \quad A_i = x_i. \tag{12}$$

Суть приведенного алгоритма заключается в том, что возникаемые погрешности оценки МБМО по отдельным параметрам входного и эталонного объектов могут иметь положительные и отрицательные полярности. Однако их значения должны подчиняться определенному закону распределения. Поэтому при совпадении входного и эталонного объектов разбросы в значениях МБМО при определенной доверительной вероятности должны лежать в установленном диапазоне. Лежащие в этом диапазоне и принимающие отрицательные приращения элементы заменяются значением математического ожидания МБМО.

В результате в заново сформированном массиве ликвидируются погрешности формирования параметров x и y, имеющие отрицательные приращения. Сформированное значение математического ожидания элементов нового массива представляет собой уточненное значение МБМО.

В качестве входного и эталонного образов использованы одни и те же и разные изображения с одинаковым и разным масштабами.

Ниже приводятся данные, полученные в результате исследований этих изображений при выполнении условий инвариантности значений МБМО к дестабилизирующим факторам.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных позволяет вывести следующую экспериментальную формулу оценки погрешностей МБМО при выполненных условиях инвариантности:

$$\delta_{\text{МБ}} = -18{,}34 \cdot 10^{-3} + 399{,}07\sigma_x - 398{,}5\sigma_y. \tag{13}$$

Функции экспериментальных зависимостей для расстояния Камберра	СКО линейной модели
$m_{МБ} = -0{,}052 - 0{,}21 d_{МБ} + 0{,}83\sigma_x - 0{,}776\sigma_y + 0{,}0069\delta_{МБ}$	0,142832
$m_{МБ} = -0{,}09 - 0{,}1225 d_{МБ} + 0{,}818\sigma_x - 0{,}785\sigma_y$	0,144424
$m_{МБ} = -0{,}1912 + 0{,}5897 d_{МБ} - 0{,}5965\delta_{МБ}$	0,907906

Максимальная погрешность определения этой формулы по экспериментальным точкам составляет 17 %.

Для дальнейшего повышения точности оценки МБМО выведены экспериментальные формулы на основе расстояния Камберра путем отбора наиболее значимых метрологических параметров измерительного канала системы распознавания образов. Таковыми являются $\delta_{МБ}$, $d_{МБ}$, σ_x и σ_y, где $d_{МБ}$ – оцениваемое значение МБМО.

В результате проведенных исследований получены формулы для уточненных значений МБМО, приведенные в таблице.

Из этих трех формул наиболее точной является первая.

Таким образом, по оцениваемым значениям $\delta_{МБ}$, σ_x, σ_y и $d_{МБ}$ можно вычислить более точное значение МБМО.

Теоретические и экспериментальные исследования расстояния Камберра в качестве МБМО показывают, что:

1. Аддитивные погрешности оценки МБМО при выполнении условий инвариантности значений МБМО к дестабилизирующим факторам становятся намного меньше.

Наиболее опасной для повышения точности оценки МБМО является мультипликативная погрешность измерения значений параметров объектов и их масштабное изменение.

2. Расстояние Камберра для использования в качестве МБМО при распознавании объектов обладает большей селективностью к действительным значениям параметров распознаваемого и эталонного образов при их совпадении по сравнению с расстояниями Манхеттена, Эвклида и другими.

3. При выполнении условий обеспечения инвариантности значения МБМО с использованием расстояния Камберра результирующая погрешность уменьшается в 2–4 раза.

4. Для дальнейшего повышения точности оценки МБМО при различии масштабов и мультипликативных ошибок измерения необходимо, чтобы параметры объектов выражались в относительных единицах [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фор А.** Восприятие и распознавание образов: Пер. с фр. А. В. Серединского /Под ред. Г. П. Катыса. М.: Машиностроение, 1989.
2. **Мамедов Р. К.** Повышение точности определения меры близости между измерительными образами при использовании расстояния Манхеттена // Ученые записки: АГНА. 1994. № 1. С. 22.

3. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1962.
4. **Алиев Т. М., Алиев Р. М., Мамедов Р. К.** Измерительно-вычислительная система распознавания двумерных изображений для робототехнических комплексов // Измерительные вычислительные системы (теория и реализация): Межвуз. сб. Новосибирск: НЭТИ, 1990. С. 17.

Поступило в редакцию 15 декабря 1997 г.