описывающий управление приборами и их взимодействие. Его текст формируется из макрокоманд взаимодействия приборов, и подстановкой в него макрокоманд нижнего уровня (управление приборами). Аналогично определяется управление целевой задачей $U(Ц_1)$.

Автор приносит благодарность сотрудникам отделения управления Мочалову В.А., Пономареву Д.В, Сафонову Д.Г. за огромное содействие в формализации задачи.

Список литературы

1. Калентьев А.А. Исчисление управляющих алгоритмов //Самарский авиационный институт. Межвуз. сб. научных трудов, 1991 г., - С. 3-10.

УДК 629.051:519.172

Е.М.Конев

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ КЛАССИФИКАТОР СИМВОЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ ПО ЦИФРОВЫМ КАРТАМ МЕСТНОСТИ

Основу алгоритмического обеспечения систем коррекции (СК) по цифровым картам местности (ЦКМ) составляют классификаторы наблюдаемых изображений (НИ) участков земной поверхности, задача которых состоит в определении вектора поправок $\rho=(\rho_x,\rho_y)$ показаний грубой навигационной системы (ГНС) в местной системе координат (МСК) OXYZ (рис.I). Для СК, функционирующих в условиях жестких ограничений на длительность T цикла коррекции, в которую входят время формирования НИ $\tau_{ни}$, время классификации $\tau_{кл}$ и время отработки управлений $\tau_{оу}$, актуальной является задача повышения быстродействия классификатора, поскольку при заданных массово-геометрических характеристиках приборов и параметрах траектории $\tau_{ни}$ и $\tau_{оу}$ строго определены. При этом необходимо обеспечить заданную надежность СК, которая оценивается вероятностью p_a аномальной привязки НИ.

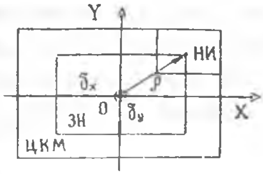

Рис. I

Таким образом, формулируется задача:

$$\left.\begin{aligned} p_a &\leqslant [p_a],\\ T &\leqslant [T],\\ \tau_{кл} &\to \min,\end{aligned}\right\}$$

где $[T]$ – предельная длительность цикла коррекции, а $[p_a]$ берется из тактико-технических требований.

1. Процедура классификации заключается в том, чтобы среди всех фрагментов ЦКМ определить тот, который обладаетнаибольшим сходством с НИ. Мерой сходства НИ V с егоэталонным изображением (ЭИ) W является значение F решающей функции (РФ), которая вычисляется обычно методом суммирования значений f парной функции в виде

$$F(\rho)=\sum_{l}\sum_{k} f[v(l,k)|w(l,k)],\ l=1,L,\ k=1,K,$$

а критерием выбора является достижение ею экстремума:

$$\rho=\underset{\rho}{\mathrm{Argmin}}\ F[V|W(\rho)].$$

По условию обеспечения высокой надежности привязки НИ применяется безусловная стратегия решающего устройства, когда поиск экстремума РФ ведется путем последовательного перебора всего массива ее значений взоне неопределенности (ЗН) H. Вычислительная трудоемкость $O(h)$ поиска истинной гипотезы $h\in H$ составляет в этом случае $N[O(F)+1]$ операций, где $N=|H|=4\delta_x\cdot\delta_y$, а δ_x, δ_y – предельные отклонения ГНС в дискретах.

2. Значительного повышения быстродействия классификатора можно достичь реализацией условной (ветвящейся) стратегии поиска истинной гипотезы, математический аппарат которой разработан в теории вопросников [I]. Наибольшее распространение получили так называемые бинарные вопросники (БВ) – орграфы $G(R,\Gamma)$, сосодержащие N вершин $h\in H$ с полустепенью исхода $a=0$ и $N-I$ вершин $q\in Q$ с $a=2$, одна из которых q_0 (корневая) имеет нулевую полустепень захода:

$$R=Q\cup H,\ r=h\in H \Rightarrow |\Gamma_h|=\varnothing,\ \sum p(h)=1,$$

$$r=q\in Q \Rightarrow |\Gamma_q|=2,\ Q\cap H=\varnothing,\ |\Gamma^{-1}_{q_0}|=\varnothing.$$

То есть БВ это нагруженное корневое дерево, висячими вершинами h которого являются гипотезы о местоположении НИ на ЦКМ с предвычисленными поправками ρ_x,ρ_y, а внутренние вершиныq (вопросы) с ценами $c(q)$ представляют собой действия, выполняемые в некоторой последовательности одно за другим, результатом которых являются бинарные разбиения текущих подмножеств $H(q) \subseteq H(q_0)$, вплоть до одноэлементных ($|h|=1$). Веса $p(h)$ являются по существу априорными вероятностями появления гипотез и легко выражаются через плотность $\varphi(x,y)$ распределения ошибок ГНС, закон которой обычно известен:

$$p(h)=p(\rho_x,\rho_y)=\int\limits_{(\Delta x \Delta y)}\int \varphi(x,y)dxdy. \qquad (1)$$

Здесь $\Delta x, \Delta y$ – размеры сторон элемента разрешения ЦКМ. Вопросы q представляют собой совокупность тестов $t \in T$ и правил мажоритарной обработки их результатов. Под тестами понимаются логические операции попарного сравнения цифровых кодов u, ε отдельных дискретов НИ и ЭИ

$$t: u(l,k) \oplus \varepsilon(l,k),\ t=0 \div 1,\ l=1,L,\ k=1,K,$$

где $\oplus$ означает операцию исключающее ИЛИ (сложение по модулю 2). Для надежности в каждой вершине q ставится n независимых тестестов. Чтобы принять решение о направлении s исхода вопроса (0 или I), проводится процедура голосования "m_s из n ", при этом n должно быть нечетно, а $m_s=(n+1)/2$. Тогда цена вопроса $c(q)$ численно равна $2n+1$ операций, а вычислительная сложность идентификации любой гипотезы из H есть цена C_μ маршрута $\mu(q_0,h)$ от корневой вершины q_0 к висячей h:

$$O(h)=C_\mu=\sum_{q \in \mu(q_0,h)} c(q).$$

C_μ зависит от длины маршрута μ (числа дуг $|\Gamma_\mu|$), которая может меняться от $\log_2 N$ (регулярный вопросник) до $N-1$ (вырожденный случай полного перебора). При оценке $O(h)$ в среднем справедлива зависимость:

$$O(h)=\mathrm{ent}\{\frac{1}{N}\sum_\mu C_\mu\},$$

где $\mathrm{ent}\{\cdot\}$ – операция выделения целой части числа.

3. Стратегия решающего устройства в виде БВ разрабатывается на этапе предполетной подготовки. В качестве исходной информации служит анкета или булева матрица инциденций B, элементы которой $b(t,h)$ определяют реакцию гипотез $(0 \div 1)$ на тесты $t \in T$ на этапе обучения (в отсутствие шумов наблюдений). Размерность анкеты $M \times N$, где $M=|T|=K \cdot L \cdot E$, а E – число различных кодов ε на эталоне. Смысл любого из тестов t заключается в том, что он разбивает множество H на два непустых класса исходов s ветвления:

$$H(t)=H_s(t) \cup H_{\bar{s}}(t),\ H_s(t) \cap H_{\bar{s}}(t)=\varnothing,$$

а T в целом порождает беллиан H. Анкета должна быть логически полной, то есть для любой пары гипотез h_i, h_j должен существовать хотя бы один разделяющий их тест t такой, что

$$(\forall h_i \in H)\&(\forall h_j \in H)_{i \neq j}\ \exists t:(h_i \in H_s(t))\&(h_j \in H_{\bar{s}}(t)). \qquad (3)$$

Это необходимое условие существования БВ, а также показатель пригодности ЦКМ. Оно не выполняется, когда два и более ЭИ топологически подобны или целиком состоят из кодов одного уровня квантования. Практически (3) означает отсутствие в B одинаковых столбцов. Численной характеристикой разделяющих признаков (откликов тестов), на основе которых происходит распознаваниеНИ, является матрица вероятностей исходов тестов $P=\|p(t,h)\|$ той же размерности, что и B. Ее получают либо на основе априорных данных и модели наблюдений, либо по результатам летных испытаний. Тогда критерием оптимизации при построении вопросника служит безусловная вероятность $p(H)$ правильного распознавания, которая соответствует байесовскому подходу в теории статистических решений:

$$\left.\begin{aligned} p(H) &= \sum_{\mu} p(h) \prod_{q \in \mu} p(q,h) \longrightarrow \max, \\ p(q,h) &= \sum_{j=m}^{n} \binom{j}{m} \sum_{i=j}^{n} \binom{i}{j} p(t_i,h), \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

а параметром оптимизации - число каналов резервирования $n=3,5,7\ldots$ узлов ветвления. Достаточным условием существования БВ в смысле (4) является наличие в B n эквивалентных тестов, которые задают одинаковые классы ветвления на H:

$$t_i \sim t_j \Leftrightarrow \forall h:(b(t_i,h) \oplus b(t_j,h))=0 \vee \forall h:(b(t_i,h) \oplus b(t_j,h))=1.$$

Процедура синтеза оптимального БВ относится к классу NP-полных задач экспоненциальной трудоемкости, поэтому на практике применяют метод выбора корневого вопроса [2]:

$$q=\operatorname*{Argmax}_{Q}[\Phi_0(q)+\Phi_1(q)], \qquad (5)$$

где $\Phi_s(q)=\sum_{h \in H_s(q)} p_s(q,h)p(h)$, а $H_s(q)=H(q_0) \setminus \bigcup_{q \in \mu(q,q_0)} \bar{H}(q)$.

Он позволяет с относительно небольшими затратами получить оптимизированный ("хороший") вопросник.

4. Алгоритм построения классификатора состоит в следующем:

I) По заданным размерам НИ K,L, ЗН δ_x, δ_y и координатам начала МСК составить символьную ЦКМ, каждому дискрету которой приписан свой код ε, имеющий, например, смысл уровня квантования сигнала.

2) Набрать анкету B и проверить ее на логическую полноту. Если (3) не выполняется, вернуться в п.I), увеличить K,L или сменить участок.

3) Расчитать по (I) априорные вероятности появления гипотез p(h) и на основе матриц B и P согласно (4) построить по алгоритму (5) вопросник G(R,Г), удовлетворяющий ограничению $1-p(H) \leq [p_a]$.

5. Рис. 2 иллюстрирует простой пример одноканального (n=I) классификатора НИ G_1 относительно бинарной карты, представленной на рис. 3. Там же показана нумерация гипотез в ЗН, размеры которой 3x3 дискрет. Закон распределения ошибок ГНС - круговой нормальный. Нумерация элементов разрешения в НИ начинается с левого верхнего угла, а его размеры - 5x5 дискрет. В таблице приведен соответствующий фрагмент анкеты $B(G_1)$. Для оценки эффективности классификатора НИ в виде БВ на данном примере было проведено сравнение его с алгоритмом модуля разности (АМР), РФ которого имеет вид

$$\Phi_{амр} = \sum_{l} \sum_{k} [u(l,k) \oplus \varepsilon(l,k)].$$

Искажения кодов НИ u имитировались путем инвертирования соответствующих кодов ЭИ ε в процентном соотношении ξ от общего числа дискретов на изображении. Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что уже при n=5 может быть достигнута надежность классификации, достаточно близкая к надежности АМР. При этом коэффициент снижения вычислительных затрат составил согласно оценкам по (2) величину 7.5.

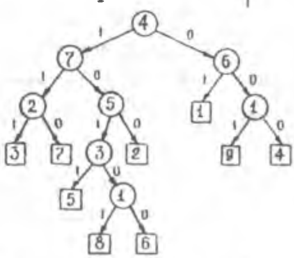

Рис. 2. Вопросник G_I

0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0
1	1	0	1	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1
0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1
0	0	1	1	1	1	0

6	2	7
5	1	3
9	4	8

Рис. 3. ЦКМ и ЗН

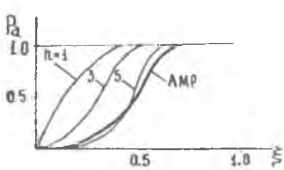

Рис. 4. Зависимость $p_a(n)$

В заключение необходимо отметить, что данный классификатор выполняет поэлементный анализ символьных изображений. Это требует предварительной обработки НИ, однако не приводит к значительным потерям в быстродействии. Поиск истинной гипотезы представляет собой процесс бинарного расщепления нечетких множеств, на каждом шаге которого решение о направлении исхода s (0÷1) принимается по значению функции принадлежности $f_s = m_s/n$. Проблема выделения эквивалентных классов ветвления решается методами неполной идентификации гипотез.

Анкета $B(G_1)$ Таблица

$t:\mathcal{E}\cdot l$		№	h								
l	k		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
1	3	2	1	1	1	1	1	1	0	1	0
1	5	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1
2	2	4	0	1	1	0	1	1	1	1	0
2	5	5	0	0	0	0	1	1	0	1	1
5	1	6	1	0	1	0	0	1	1	0	0
5	3	7	0	1	0	1	1	1	0	1	1
$p(h)\cdot 10^{-2}$			34	16	16	16	16	3	3	3	3

Список литературы:

1. Picard C.F. Theorie des questionnaires. Paris:Gauthier-Villars, 1965, p. 182.

2. Аржененко А.Ю., Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 629.782

В.В.Корабельщиков, Д.М.Суринский

НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КА

В настоящее время на космических аппаратах (КА), предназначенных для дистанционного зондирования земной поверхности, все чаще находит применение длиннофокусная узкоугольная целевая аппаратура, требующая от системы управления движением прецизионной ориентации КА при отслеживании им интенсивного программного углового движения. Системы ориентации подобных КА, как правило, имеют в своем составе бесплат-