Ensayos

Adaptación del método de la marca estocástica para reconocimiento de cuerpos tridimensionales

Resumen

El reconocimiento de cuerpos tridimensionales se formula como un problema de búsqueda de correspondencia entre la descripción de escena obtenida por el procesamiento de datos iniciales y los modelos estructurales de clases permitidas [1]. La búsqueda de correspondencia entre la descripción inicial y el modelo por el método de la marca estocástica, que permite la realización en la red de microprocesadores los cuales trabajan paralelamente, fue propuesta en [2 y 3]. A diferencia de [2], se analiza la versión del algoritmo con dimensión arbitraria de los vectores unitarios de probabilidades para tener la posibilidad de utilizar un número arbitrario de nombres usados para construir la marca estocástica inicial para los diferentes nodos del grafo de búsqueda. A diferencia de [3], se toma en consideración más de un candidato al elemento estructural para calcular del vector de la compatibilidad que se usa para tomar en cuenta las relaciones entre los nodos del grafo. Para proveer la corrección de la marca estocástica inicial se propone un criterio de dependencia de la marca estocástica inicial con la exactitud de mediciones de los datos iniciales. Se propone un criterio parcial para reducir la dimensión del vector de la marca estocástica inicial y para reducir el número de los nodos del grafo que se usa en el procesamiento de verificación de la marca estocástica inicial, por medio del uso de las relaciones entre los elementos estructurales.

Abstract

Recognition of three-dimensional bodies is formulated as a problem of searching for a correspondence between a scene description obtained by processing initial data and the structural models of classes allowed [1]. The search for correspondence between the initial description and the model by means of the stochastic labelling method, which in the microprocessors network works in parrallel mode, was proposed in [2 and 3]. Unlike [2], the algorithm version with an arbitrary dimension of the unitary vectors of probabilities is analysed so that it is possible to use an arbitrary number of used names to build an initial stochastic label for the different search graph nodes. Unlike [3], more than one candidate for the structural element is considered to calculate the compatibility vector which is used to take into account the relationships between graph nodes. To provide correction of the initial stochastic label, a criterion based on dependence of initial stochastic labelling of data measurement precision is proposed. A partial criterion is proposed to reduce the vector dimension of the initial stochastic label, and to reduce the number of graph nodes which are used to process its verification by using the relationships between the structural elements.

Abstrait

La reconnaissance des corps tridimensionnels se forme comme un problème de recherche de correspondance entre la description de scène obtenue par le processus des dates initiales et les modules structuraux de classes permises [1]. La recherche de correspondance entre la description initiale et le module par la méthode de la marque stochastique qui permet la réalisation du réseau des microprocesseurs, qui travaillent en parallèle, fut proposé en [2 et 3]. A la différence du [2], on analyse la version de l'algorithme avec une dimension arbitraire des vecteurs unitaires des probabilités pour avoir la possibilité d'utiliser un nombre arbitraire des désignations utilisées pour construire la marque stochastique initiale pour les différents nœuds du graphe de recherche. A la différence du [3], on prend en considération plus d'un candidat à l'élément structurel pour calculer le vecteur de la compatibilité qui sera utilisé pour prendre en compte les relations entre les nœuds du graphe. Pour pouvoir corriger la marque stochastique initiale on propose un critère de dépendance de la marque stochastique initiale avec les mesures exactes des données initiales. On propose un critère partiel pour réduire la dimension du vecteur de la marque stochastique initiale et pour réduire le nombres des nœuds du graphe qui sont utilisés dans le processus de vérification de la marque stochastique initiale par le biais de l'usage des relations entre les éléments structurels.

* Dr. Vitaliy Rybak

* *Profesor Investigador de la Universidad Tecnológica de la Mixteca*

1. Introducción

El reconocimiento de cuerpos tridimensionales se formula como un problema de búsqueda de correspondencia entre modelos estructurales de clases permitidas y la descripción de escena obtenida por el procesamiento de datos iniciales [1]. Los cuerpos tridimensionales se caracterizan por la forma, la dimensión y los parámetros fotométricos de sus superficies. El

modelo geométrico de los cuerpos tridimensionales se representa en términos de elementos estructurales y las relaciones entre ellos. Como elementos estructurales se usan las superficies que forman el cuerpo, y las líneas de los bordes entre estas superficies. El modelo se interpreta como una red semántica y se representa por un grafo. En los nodos del grafo está contenida la información sobre los elementos estructurales y en los arcos está contenida la información sobre las relaciones. El modelo de escena tiene una estructura jerárquica. El nivel más alto corresponde a la escena y el nivel más bajo a los elementos estructurales.

Al mismo tiempo sólo una parte del cuerpo es accesible a la vista, que llamamos la parte visible. Los datos iniciales están determinados en la parrilla discreta $Z_{I,J}=\{(i,j):\ 1\le i\le I, 1\le j\le J\}$ como imágenes visuales $B:\ Z_{I,J}\to[0,B_{\max}]$ y como valores de las coordenadas tridimensionales ("imágenes espaciales") $V:\ Z_{I,J}\to R^3$ de las partes visibles. Sea la función-Φ de descripción de escena que esta definida y que tiene el mismo dominio de determinación que *B y V* y que puede aceptar como valores los nombres de los elementos estructurales del alfabeto Ω $\Phi:\ Z_{I,J}\to\Omega$. La función Φ describe la escena pero sus valores no pueden ser medidos directamente en los nodos separados de la parrilla. El problema de reconocimiento de escena consiste en la definición de los valores de la función Φ con tal de que sean conocidos *B, V* y el modelo que junta esa tríada. La definición de los valores de la función Φ es equivalente a la definición:

del subconjunto $S_m\subset Z_{I,J}$, $m\in S$, $S\subset\Omega$ tal que $S_m=\{(i,j):\ (i,j)\in Z_{I,J}, \Phi_{i,j}=m\}$ y del subconjunto $E_l\subset Z_{I,J}$, $l\in L$, $L\subset\Omega$ tal que $E_l=\{(i,j):\ (i,j)\in Z_{I,J}, \Phi_{i,j}=l\}$. Los subconjuntos S_m y E_l corresponden a los nombres de las superficies que forman el cuerpo, y las líneas de los bordes entre superficies respectivamente.

Reconocer un cuerpo de algún bloque de clases permitidas significa seleccionar a aquellos subconjuntos S_m y E_l los cuales corresponden a los elementos estructurales del modelo de la parte visible del cuerpo. Este problema se resuelve por procesamiento de los datos iniciales *B y V* para seleccionar las regiones homogéneas en sentido definido y las líneas de los bordes entre regiones. Los valores de los parámetros de las regiones y líneas seleccionadas se comparan con los valores de los parámetros de los elementos estructurales del modelo. Los nombres de las regiones similares al elemento estructural de acuerdo con el criterio usado se prescriben al nodo del grafo que corresponde a este elemento estructural como candidatos a este elemento estructural. El problema de reconocimiento en este caso consiste en la selección de un candidato único para cada nodo del grafo, del modelo al cual se le da el nombre de este nodo, por análisis de correspondencia de las relaciones entre los candidatos a elementos estructurales y las relaciones entre los elementos estructurales del modelo.

Ese problema puede ser resuelto por el método de la marca estocástica que fue propuesto en [2] y [3]. La selección de este método se explica por medio de dos puntos principales: en primer lugar, el modelo en que se basa este método expresa mejor los aspectos de cálculo que los aspectos físicos, y no contradice al planteamiento del problema formulado; y en segundo lugar, permite la realización del algoritmo en modo paralelo en la red de microprocesadores, topología de la cual corresponde al modelo de escena.

Los resultados del análisis permiten definir al subgrafo que corresponde al modelo del cuerpo de la parte visible. Es conocido que en caso común de utilizar los métodos de reconocimiento estructurales lleva a la búsqueda del isomorfismo del subgrafo al grafo que se refiera al problema NP-completo. Para construir sistemas aplicados de reconocimiento de cuerpos tridimensionales es necesario buscar heurísticas que permitan reducir considerablemente el número de variantes de solución seleccionadas. Las propuestas heurísticas en [4 y 5] se basan en la cooperación de los agentes que procesan los datos de naturaleza física diferente: en la utilización de información sobre escena de fuentes no visuales [4], y en la cooperación de los agentes que procesan imágenes y datos de medición espacial de los objetos de escena [5]. La primera heurística permite reducir el problema de reconocimiento de los objetos de escena al problema de verificación de la correspondencia del estado corriente de escena a su estado esperado. En este caso el subgrafo del modelo que corresponde a la parte visible del cuerpo es conocido, y es necesario confirmar la correspondencia de los datos iniciales al subgrafo. El problema de reconocimiento se conserva sólo en caso de que el estado esperado no se confirme, pero

con eso el número de objetos de reconocimiento, el número de clases y el volumen del espacio analizado están considerablemente limitados. La segunda heurística permite limitar el número de candidatos a elementos estructurales usados en la búsqueda de correspondencia entre la descripción de escena y los modelos de los cuerpos tridimensionales.

Otra posibilidad de aceleración del trabajo de los sistemas aplicados basados en la utilización del método de la marca estocástica, es la limitación del numero de los nombres usados para construir la marca estocástica inicial $\boldsymbol{p}_i^{(0)}$ que lleva, a diferencia de [2], a usar los vectores unitarios $\boldsymbol{p}_i$ de probabilidades de la dimensión arbitraria, y, a diferencia de [3], toma en consideración más de un candidato al elemento estructural para calcular del vector de la compatibilidad $\boldsymbol{q}_i$ que se usa para tomar en cuenta las relaciones entre los nodos del grafo. Para la limitación del número de nombres usados para construir la marca estocástica inicial se propone un criterio de dependencia de la marca estocástica inicial con la exactitud de mediciones de los datos iniciales. Se propone un criterio parcial que permite reducir la dimensión del vector de la marca estocástica inicial y también reducir el número de los nodos del grafo que se usa en el procesamiento de verificación de la marca estocástica inicial, por medio del uso de las relaciones entre los elementos estructurales.

1. El algoritmo de la marca estocástica

Más abajo el algoritmo de la marca estocástica [2,3] se expone en forma que permite a cada vector unitario de probabilidades $\boldsymbol{p}_i$ tener la dimensión individual y está deduciendo la fórmula final del cálculo de $\boldsymbol{grad}_i J$ que toma en consideración más de un candidato al elemento estructural para calcular del vector de la compatibilidad $\boldsymbol{q}_i$.

Dado el conjunto de nodos U. Un conjunto de nodos $V_i = \{u_1,...,u_{|V_i|}\}$ donde $|V_i|$ es el número de nodos en V_i que esta vinculado al nodo $u \in U$. Los nodos $u_j \in V_i$, $j = \overline{1,|V_i|}$ están conectados con u_i por relaciones que define la estructura topológica en U.

Dado el conjunto de nombres $N = \{n_{i1},...,n_{iL_i}\}$ donde L_i es el número de nombres en N_i (nombres de los candidatos a elementos estructurales los cuales puedan estar relacionados con u_i). Para cada nodo u_i es necesario construir un vector unitario de probabilidades $\boldsymbol{p}_i = \left[p_i(n_{i1}),...,p_i\left(n_{iL_i}\right)\right]$,

$$\sum_{l=1}^{L_i} p_i(n_{il}) = 1$$

Al final del funcionamiento del algoritmo, el vector p_i define un nombre desde N_i el cual se relaciona únicamente con el nodo u_i. El conjunto de todos los vectores p_i se llama marca estocástica del conjunto de nodos U. La probabilidad $p_i(n_{il})$ es la tasa de convicción (de seguridad) en la corrección de la marca del nodo u_i por el nombre n_{il}.

La marca estocástica inicial $\boldsymbol{p}_i^{(0)}$ resulta del cómputo de la función $f(u_i,n_{il})$, $n_{il} = \overline{1,L_i}$ de la similitud entre u_i y el nombre n_{il} desde N_i mediante la comparación de los valores de atributos de los nodos y los valores de los atributos calculados para los nombres desde N_i sin la consideración de las relaciones entre los nodos.

$$p_i^{(0)}(n_{il}) = \frac{f(u_i,n_{il})}{\sum_{l=1}^{L_i} f(u_i,n_{il})}$$

El algoritmo del cómputo $f(u_i,n_{il})$ se pone en la parte 3.

La consideración de las relaciones entre los nodos se realiza mediante el cómputo del vector de la compatibilidad $\boldsymbol{q}_i$ para cada nodo u_i. Dicho vector define en que medida cada nombre n_{il}, $l = \overline{1,L_i}$ corresponde al nodo u_i con la consideración de marcas (nombres) que están prescritas a los nodos del conjunto V_i, en otras palabras, con la consideración de la marca actual de los nodos del conjunto V_i.

$q_i(n_{il}) = \frac{Q_i(n_{il})}{\sum_{l=1}^{L_i} Q_i(n_{il})}$, donde

$Q_i(n_{il}) = \frac{1}{|V_i|}\sum_{u_j \in V_i} Q_{ij}(n_{il})$, donde

$$Q_{ij}(n_{il}) = \sum_{k=1}^{L_j} c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right) p_j\left(n_{jk}\right),$$

donde $c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)$ es la tasa de correspondencia de las relaciones entre los nodos u_i y u_j, y las relaciones entre los nombres n_{il} y n_{jk}. El modelo del cuerpo tridimensional utiliza las relaciones lineales y

angulares entre los elementos estructurales. La función $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$ depende de la clase del cuerpo y debe ser representada para cada clase en forma individual. El algoritmo del cómputo $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$ se pone en la parte 4. Para ilustrar los cálculos de $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$, $Q_{ij}(n_{il})$, $Q_i(n_{il})$ y $q_i(n_{il})$ un ejemplo artificial está puesto en Apéndice B.

Los vectores $\boldsymbol{q}_i$ se usan para la verificación de los vectores de la marca inicial $\boldsymbol{p}_i^{(0)}$, $i = \overline{1,|U|}$, donde $|U|$ es el número de nodos en U. Ya que existe concatenación entre los conjuntos $\{\boldsymbol{q}_i\}$ y $\{\boldsymbol{p}_i\}$, entonces la verificación representa el proceso iterativo en cada paso del cual se verifican los valores actuales de los vectores $\boldsymbol{p}_i$, $i = \overline{1,|U|}$.

Es evidente que si la marca del grafo esta hecha correctamente el vector de convicción $\boldsymbol{p}_i$ será unitario. Esto corresponde al mínimo de inambigüedad de la marca y también el vector de la compatibilidad $\boldsymbol{q}_i = \boldsymbol{p}_i$, que corresponde al mínimo de la incompatibilidad. La tasa local de la inambigüedad e incompatibilidad $J_i = -\boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{q}_i$ corresponde a estas condiciones, donde el signo " $\cdot$" es el símbolo del producto escolar. La tasa global de la inambigüedad e incompatibilidad se define como la suma de las tasas locales

$$J = \sum_{u_i \in U} J_i .$$

Si la marca estocástica inicial $\boldsymbol{p}_i^{(0)}$, $i = \overline{1,|U|}$ esta conocida del problema de la marca estocástica se formula como el problema de encontrar el conjunto de vectores $\{\boldsymbol{p}_i^*\}$ probabilidades los cuales proveen el mínimo local de la función con la condición de que se satisfagan las siguientes restricciones:

$$\sum_{l=1}^{L_i} p_i(n_{il}) = 1, \qquad i = \overline{1,|U|}$$

$$p_i(n_{il}) \geq 0, \qquad l = \overline{1,L_i}$$

Estas restricciones lineales definen la rama cerrada convexa A de R^m, $m = \sum_{i=1}^{|U|} L_i$.

La función J es diferenciable y el mínimo local de J puede ser encontrado por el método del descenso rápido. El vector de gradiente $\boldsymbol{grad}\, J = \dfrac{\partial J}{\{\partial \boldsymbol{p}_i\}}$ de la dimensión $m = \sum_{i=1}^{|U|} L_i$ puede ser representado como la composición de $|U|$ vectores de la dimensión de cada vector L_i, $i = \overline{1,|U|}$.

$$\frac{\partial J}{\{\partial \boldsymbol{p}_i\}} = \left(\frac{\partial J}{\partial p_1(n_{11})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_1(n_{1L_1})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_i(n_{i1})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_i(n_{iL_i})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_{|U|}(n_{|U|1})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_{|U|}(n_{|U|L_{|U|}})} \right)$$

En una etapa de optimización solo la función J_i del nodo i y las funciones J_j, $j \in V_i$ de los nodos conectados por relaciones con u_i, dependen del vector $\boldsymbol{p}_i$. Por esto si al calculo de derivativas parciales en $\boldsymbol{p}_i$ de función local J_i del nodo i añadiéramos el cálculo de derivativas parciales en $\boldsymbol{p}_i$ de funciones locales J_i de los nodos del conjunto V_i obtenemos el vector-gradiente local $\boldsymbol{grad}_i\, J$:

$$\boldsymbol{grad}_i\, J = \frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{p}_i} = \left(\frac{\partial J}{\partial p_i(n_{i1})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_i(n_{iL_i})} \right).$$

El esquema iterativa se define como (véase [3]):

$$\boldsymbol{p}_i^{(n+1)} = \boldsymbol{p}_i^{(n)} + \rho_n P_i \{\boldsymbol{grad}_i\, J\} \qquad n = 0,1,\ldots$$

donde ρ_n es un valor positivo del paso del descenso rápido, P_i es un operador de la proyección lineal el cual se define por las restricciones del vector $\boldsymbol{p}_i$ mencionados y n es un número de iteración.

Un componente de número l del $\boldsymbol{grad}_i\, J$, $l = \overline{1,L_i}$, $i = \overline{1,|U|}$ se define (véase Apéndice A) como

$$\frac{\partial J}{\partial p_i(n_{il})} = -\left[q_i(n_{il}) + \sum_{u_j \in V_i} \frac{\sum_{m=1}^{L_j} c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il}) \left(p_j(n_{jm}) - \boldsymbol{p}_j \cdot \boldsymbol{q}_j \right)}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})} \right]$$

Esta formula difiere de la fórmula original de acuerdo con [3] por la presencia del multiplicador $|V_j|$.

2. Reducción preliminar de la dimensión del vector, de la marca estocástica inicial

La complejidad de la búsqueda de correspondencia entre los datos iniciales y el modelo del cuerpo tridimensional en gran medida se explica por la contradicción siguiente. Aunque el cuerpo tridimensional se describe uniformemente por dos características principales: por los elementos estructurales y por las relaciones entre ellos, no es posible que determinen las relaciones directamente por el procesamiento de los datos iniciales. Eso es justamente lo que induce a un gran número de candidatos a elemento estructural o, lo que es lo mismo, a una gran dimensión del vector de la marca estocástica inicial del nodo respectivo del grafo del modelo del cuerpo. El entendimiento de esta contradicción permite, en casos particulares, modificar el algoritmo de la marca estocástica original de manera que permite reducir el número de candidatos a elemento estructural inicialmente prescritos al nodo respectivo del grafo antes de y durante el proceso de verificación de los vectores de la marca inicial (o, lo que es lo mismo, el procedimiento de búsqueda del mínimo local de la función J).

Un criterio parcial de utilización de las relaciones entre los elementos estructurales para reducir la dimensión del vector de la marca estocástica inicial antes de utilizar el procesamiento de su verificación de acuerdo con [3], se basa en un análisis preliminar de los valores de $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$, $i \neq j, i=\overline{1,|U|}, j=\overline{1,|U|}, l=\overline{1,L_i}, k=\overline{1,L_j}, n_{il} \neq n_{jk}$. Un nombre n_{il}, se excluye de la lista de los candidatos a elemento estructural del nodo u_i, si el valor de $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$ para todos los $k=\overline{1,L_j}$ no supera un límite Δ_0 que es una cota inferior, tal que $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$ se iguala a cero para $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk}) \leq \Delta_0$.

En el ejemplo, de acuerdo con el Apéndice B, es posible que se excluye de la lista de los candidatos a elemento estructural del nodo u_1 un nombre $n_{13} = S_3$, porque $c(u_1, n_{13}, u_2, n_{21}) = c(u_1, n_{13}, u_2, n_{22}) = c(u_1, n_{13}, u_2, n_{23}) = 0$. Análogamente se excluyen: $n_{12} = S_2$ porque $c(u_1, n_{12}, u_3, n_{31}) = c(u_1, n_{12}, u_3, n_{32}) = c(u_1, n_{12}, u_3, n_{33}) = 0$.

Continuando de esta manera con el análisis, es posible que se excluyan también $n_{21} = S_1$, $n_{23} = S_3$, $n_{31} = S_1$ y $n_{32} = S_2$. Pero estas operaciones se realizan de una forma más simple si para el análisis de las relaciones de los candidatos de los nodos u_2 y u_3 con los candidatos del nodo u_1 se usa la lista de los candidatos del nodo u_1 verificada, porque esto contiene sólo un candidato $n_{11} = S_1$. En este ejemplo artificial cuando la exactitud del cómputo es ideal y las relaciones entre los nodos son bien distintas, es posible que se obtenga un resultado final en el estado del análisis de las relaciones preliminares sin el uso del proceso de optimización del criterio *J*.

El uso de los nodos con sólo un candidato a elemento estructural tiene el carácter más general y se usa para reducir el número de candidatos a elemento estructural inicialmente prescritos al nodo respectivo del grafo antes de y durante el proceso de verificación de los vectores de la marca inicial.

El uso de las relaciones con los nodos con sólo un candidato a elemento estructural consiste en lo siguiente. Durante el análisis preventivo se analiza el número de candidatos a elementos estructurales prescritos a cada nodo del grafo. Si se encuentra el nodo (nodos) con sólo un candidato a elemento estructural, se examinan todos los candidatos a elementos estructurales de otros nodos conectados con este nodo (nodos) por relaciones. Si las relaciones de algunos candidatos a candidato único no corresponden a las relaciones entre sus nodos y el nodo (nodos) con el candidato único, estos candidatos se excluyen desde lista de los candidatos. Después de esta examinación, se corrige la marca estocástica inicial y se realiza el algoritmo de búsqueda del mínimo local de la función *J*. Las mismas acciones se ejecutan durante el trabajo del algoritmo de búsqueda del mínimo local de la función *J*, para verificar los vectores de la marca inicial: si en alguna iteración del trabajo del algoritmo resulta un vector unitario de probabilidades $\boldsymbol{p}_i = [0,...,0, p_i(n_{il}) = 1, 0...,0]$, se examinan todos los nodos u_i conectados con el nodo por relaciones y se excluyen sus candidatos a elementos estructurales los cuales tienen las relaciones con el candidato con nombre n_{il} del nodo u_i que son contradictorios en el sentido mencionado.

La exclusión de los candidatos de la lista de los candidatos prescritos al nodo del grafo, reduce la dimensión y aumenta los valores de los componentes

del vector de la marca estocástica inicial del nodo respectivo del modelo del cuerpo. Al mismo tiempo se reduce la dimensión del grafo porque cada nodo con solo un candidato a elemento estructural se excluye del proceso de búsqueda del mínimo local de la función J. El factor $|V_i|$ en la fórmula de cálculo de $\frac{\partial J}{\partial p_i(n_{il})}$ permite tomar en consideración el cambio del número de los nodos del grafo.

3. Algoritmo de cálculo de correspondencia, entre los elementos estructurales y los candidatos a elementos estructurales

El valor de correspondencia entre el elemento estructural i-ésimo y el candidato a elemento estructural k-ésimo se calcula como valor de la siguiente función definida en un intervalo [0, 1]

$$f(u_i,n_{il})=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\frac{\left(\alpha_k v_i^{(k)}\right)^2}{\left(\alpha_k v_i^{(k)}\right)^2+\left(v_i^{(k)}-w_l^{(k)}\right)^2}$$

donde $v_i^{(k)}$ es el valor de la característica *k*-ésimo del elemento estructural *i*-ésimo del modelo;

$w_l^{(k)}$ es el valor de la característica *k*-ésimo del candidato *l*-ésimo al elemento estructural *i*-ésimo;

α_k es el coeficiente de peso (aportación), el cual define la forma (anchura) de la función.

En el caso cuando $v_i^{(k)}=0$ el sumando *k*-ésimo cambia a la siguiente expresión $\frac{\Delta_k^2}{\Delta_k^2+\left(w_l^{(k)}\right)^2}$,

donde Δ_k es la cantidad que depende de la deflexión de $w_{il}^{(k)}$ de cero.

El valor de α_k se elija de acuerdo con la condición heurística:

$$\frac{\left(\alpha_k v_i^{(k)}\right)^2}{\left(\alpha_k v_i^{(k)}\right)^2+\left(v_i^{(k)}-\left(w_l^{(k)}\right)^*\right)^2}=0.5,$$

donde $\left(w_l^{(k)}\right)^*$ es el valor de la característica *k*-ésimo del candidato *l*-ésimo al elemento estructural *i*-ésimo, que corresponde a la igualdad $\left|\alpha_k v_i^{(k)}\right| = \left|v_i^{(k)}-\left(w_l^{(k)}\right)^*\right|$.

Entonces α_k el valor de se define por la elección del valor de $\left(w_l^{(k)}\right)^*$ para el cual se considera justificado que el sumando *k*-ésimo de la función de correspondencia $f(u_i,n_{il})$ es igual a 0.5. El valor de Δ_k se elige analógicamente.

La siguiente transformación de $f(u_i,n_l)$

$$f(u_i,n_{il})=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\left(1+\frac{1}{\alpha_k^2}\left(1-\frac{w_l^{(k)}}{v_i^{(k)}}\right)^2\right)^{-1}$$

permite definir su dependencia del valor relativo $w_l^{(k)}/v_i^{(k)}$. La gráfica de la dependencia de la función $f(u_i,n_{il})=\left(1+\frac{1}{\alpha_k^2}\left(1-\frac{w_l^{(k)}}{v_i^{(k)}}\right)^2\right)^{-1}$ en un intervalo $0.5\le f(u_i,n_{il})\le 1$ de $w_l^{(k)}/v_i^{(k)}$ con valores diferentes de α_k, se muestra en la Figura 1.

Notamos que la función $f(u_i,n_{il})$ en un intervalo de valores de 0.5 a 0.95 puede ser enderezada con una exactitud admisible (vease Fig.1) que permita acelerar los cálculos en comparación con la formula original.

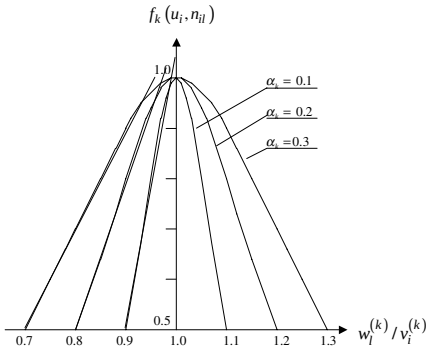


FIGURA 1. DEPENDENCIA DE LA FUNCIÓN $f_k(u_i,n_{il})$ EN UN INTERVALO $0.5\le f_k(u_i,n_{il})\le 1$ DE $w_l^{(k)}/v_i^{(k)}$ CON VALORES DIFERENTES DE α_k

A su vez la elección de $\left(w_l^{(k)}\right)^*$ se define por certeza de cálculo del valor $w_l^{(k)}$ de la cual depende de la exactitud de medida de los datos iniciales y del volumen de los datos iniciales el cual es accesible para medir. Cuanto más alta sea la certeza de $w_l^{(k)}$ menor será el valor de α_k. Esto da un incremento a la consistencia de la marca estocástica inicial del grafo $p_i^{(0)}$ y lleva a la compresión del número de candidatos a elementos estructurales L_i, los cuales se conectan al nodo del modelo, que acorta la dimensión del vector p_i y al mismo tiempo acorta el volumen y el tiempo

de cómputo. Por otro lado en caso de que la certeza de $w_l^{(k)}$ sea baja, tomando en cuenta la certeza de $w_l^{(k)}$ para aumentar el valor de $\boldsymbol{p_i}$ permita esquivar en falso a los candidatos a elementos estructurales, los cuales se conectan al nodo del modelo.

La estimación de la certeza de $w_l^{(k)}$ se basa en la estimación de la exactitud de medida de las coordenadas tridimensionales de los puntos de superficies de los cuerpos y de la exactitud de aproximación de los conjuntos de los puntos tridimensionales por superficies de primero y segundo orden. Es posible obtener directamente la exactitud de medida de las coordenadas tridimensionales, por ejemplo como el valor del intervalo confidencial desde los resultados de definición automática de coordenadas espaciales de superficies por imágenes estereoscópicas [6], o como el valor de confianza en el sistema estereoscópico [7]. La exactitud de aproximación de los conjuntos de los puntos tridimensionales por superficies de primero y segundo orden, se calcula como la distancia media cuadrática entre conjuntos de los puntos tridimensionales y la superficie que los aproxima.

4. Algoritmo de cálculo de la tasa de correspondencia $c(u_i,n_{il},u_j,n_{jk})$

El valor de $c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)$ se calcula de la misma forma que el valor de $f\left(u_i,n_{il}\right)$:

$$c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)=\frac{1}{S_1^{ij}}\sum_{s=1}^{S_1^{ij}}\left(1+\frac{1}{b_s^2}\left(1-\frac{r_s^{(lm)}}{R_s^{(ij)}}\right)^2\right)^{-1}+\frac{1}{S_2^{ij}}\sum_{s=1}^{S_2^{ij}}\left(\left(1-\frac{r_s^{(lm)}}{\rho_s}\right)^2\right)^{-1}$$

donde $R_s^{(ij)}$ es el valor de la relación espacial *s*-ésimo entre el nodo (elemento estructural) *i*-ésimo y el nodo (elemento estructural) *j*-ésimo;

$r_s^{(lm)}$ es el valor de la relación espacial *s*-ésimo entre el nombre (candidato a elemento estructural) *l*-ésimo del nodo *i*-ésimo y el nombre (candidato a elemento estructural) *m*-ésimo del nodo *j*-ésimo;

b_s es un coeficiente de peso;

ρ_s es el número de un umbral;

S_1^{ij} es un número de relaciones entre los elementos estructurales *i*-ésimo y *j*-ésimo diferentes de cero;

S_2^{ij} es un número de relaciones entre los elementos de *ak*, estructurales *i*-ésimo y *j*-ésimo iguales a cero.

Los valores de b_s y ρ_s se eligen tomando en cuenta la certeza del valor de $r_s^{(lm)}$ el cual se calcula en la base de valores de parámetros de ecuaciones que circunscriben a los candidatos a elementos estructurales correspondientes y se originan como resultado de la aproximación de los datos iniciales.

Los valores de $c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)$ calculados para cada par de nodos u_i,u_j una vez antes de la búsqueda del mínimo local de *J*, se usan para el cómputo de los valores $Q_{ij}\left(n_{jm}\right)$ en cada paso iterativo del proceso de optimización del criterio *J*. La corrección del cómputo para cada nodo u_i del vector de la compatibilidad $\boldsymbol{q_i}$ define el éxito de todo algoritmo de la marca estocástica. Por lo tanto se compensan los gastos por el cómputo de $c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)$ tomando en consideración la exactitud de mediciones de los datos iniciales.

Conclusión

La reducción del número inicial de variantes de solución seleccionadas en el problema de búsqueda de correspondencia entre los modelos de clases permitidas y la descripción obtenida por el procesamiento de datos iniciales es una condición importante para construir sistemas aplicados de reconocimiento de patrones basados en métodos estructurales de reconocimiento. Para alcanzar esta meta, en caso de que se use el método de la marca estocástica, ha sido propuesto computar la función de similitud $f\left(u_i,n_{il}\right)$ y la tasa de correspondencia de las relaciones entre los nodos y entre los nombres $c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)$ de acuerdo con un criterio de dependencia a la exactitud de mediciones de los datos iniciales de los valores de $f\left(u_i,n_{il}\right)$ y de $c\left(u_i,n_{il},u_j,n_{jk}\right)$. La propuesta se basa en el principio de buen sentido cuando el rechazo de conectar un nombre al nodo del grafo se realiza, sólo en caso de que la exactitud de las mediciones de los datos iniciales provea la corrección de tal acción. Esto se alcanza por medio de la selección del valor del coeficiente α_k en correspondencia con la exactitud mencionada. Para la exactitud más alta se selecciona el valor menor de α_k, que corresponde a la función $f\left(u_i,n_{il}\right)$ más angosta. Esta, supera un límite de rechazo (por ejemplo, $f\left(u_i,n_{il}\right)>0.8$) con una diferencia menor entre los valores de $v_i^{(k)}$ y $q_l^{(k)}$.

La posibilidad de reducir el número de los nombres (de los candidatos a los elementos estructurales) usados para la marca inicial y el número de los nodos del grafo, los cuales se usan en el procesamiento de verificación de la marca estocástica inicial, se requirió verificar el algoritmo de la marca estocástica original en parte de las formulas del cómputo del vector de gradiente ***grad*** *J*, así como de la composición de vectores de la dimensión arbitraria. La solución obtenida permite realizar el algoritmo de búsqueda del mínimo de la función *J* con los vectores de la dimensión arbitraria de modo paralelo en la red de microprocesadores. Una topología de la red inicialmente corresponde al modelo de escena y se cambia en el proceso de verificación de la marca estocástica porque cada nodo con sólo un candidato a elemento estructural se excluye del proceso de búsqueda del mínimo local de la función *J*. En el final del proceso de búsqueda del mínimo de la función *J* una topología de la red inicial se recupera. En caso de que el trabajo del algoritmo de la marca estocástica sea exitoso, es posible definir el nombre del objeto reconocido. Al mismo tiempo cada candidato a elemento estructural adquiere el nombre de su nodo. En otras palabras, es posible seleccionar los subconjuntos S_m y E_l los cuales corresponden a los elementos estructurales del modelo de la parte visible del cuerpo (véase Introducción).

Hay que decir que las propuestas son prácticas porque, como se indicó más arriba, existen medios de medición de coordenadas espaciales, los cuales simultáneamente con los datos de medición, definen la estimación de su exactitud.

Apéndice A

Cálculo de los componentes del vector $\boldsymbol{grad}_i J$

$$\boldsymbol{grad}_i J = \frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{p}_i} = \left(\frac{\partial J}{\partial p_i(n_{i1})}, \ldots, \frac{\partial J}{\partial p_i(n_{iL_i})} \right)$$

Un componente de número l del $\boldsymbol{grad}_i J$ se define como

$$\frac{\partial q_j(n_{jm})}{\partial p_i(n_{il})} = \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \frac{Q_j(n_{jm})}{\sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})} = \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \frac{\frac{1}{|V_j|}\sum_{u_k \in V_j} Q_{jk}(n_{jm})}{\sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})} =$$

$$= -q_i(n_{il}) - \sum_{u_j \in V_i} \sum_{m=1}^{L_j} p_j(n_{jm}) \frac{\partial q_j(n_{jm})}{\partial p_i(n_{il})}.$$

$$\frac{\partial J}{\partial p_i(n_{il})} = \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \left(J_i + \sum_{u_j \in V_i} J_j \right) = \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \left(-\boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{q}_i - \sum_{u_j \in V_i} \boldsymbol{p}_j \cdot \boldsymbol{q}_j \right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \frac{Q_{ji}(n_{jm}) + \sum_{u_k \in V_j^1} Q_{jk}(n_{jm})}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})},$$

donde V_j^1 es subconjunto obtenido del conjunto V_j por exclusión del V_j el nodo u_i.

$$\frac{\partial q_j(n_{jm})}{\partial p_i(n_{il})} = \frac{\sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm}) \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} Q_{ji}(n_{jm}) - \sum_{u_k \in V_j} Q_{jk}(n_{jm}) \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \sum_{m=1}^{L_j} \frac{1}{|V_j|} \sum_{u_k \in V_j} Q_{jk}(n_{jm})}{|V_j| \left(\sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm}) \right)^2}$$

$$= \frac{\frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} Q_{ji}(n_{jm})}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})} - \frac{Q_j(n_{jm}) \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \sum_{m=1}^{L_j} \sum_{u_k \in V_j} Q_{jk}(n_{jm})}{|V_j| \left(\sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm}) \right)^2} =$$

$$= \frac{\frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} Q_{ji}(n_{jm})}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})} - \frac{q_j(n_{jm}) \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm}) \frac{\partial}{\partial p_i(n_{il})} \sum_{m=1}^{L_j} \sum_{u_k \in V_j} Q_{jk}(n_{jm})}{|V_j| \left(\sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm}) \right)^2} =$$

$$= \frac{c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il}) - q_j(n_{jm}) \sum_{m=1}^{L_j} c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il})}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})}$$

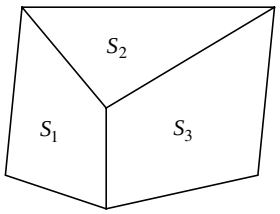
$$\frac{\partial J}{\partial p_i(n_{il})} = -q_i(n_{il}) - \sum_{u_j \in V_i} \sum_{m=1}^{L_j} p_j(n_{jm}) \frac{\partial q_j(n_{jm})}{\partial p_i(n_{il})} =$$

$$= -q_i(n_{il}) - \sum_{u_j \in V_i} \sum_{m=1}^{L_j} p_j(n_{jm}) \frac{c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il}) - q_j(n_{jm}) \sum_{m=1}^{L_j} c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il})}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})}$$

$$= -q_i(n_{il}) - \sum_{u_j \in V_i} \frac{\sum_{m=1}^{L_j} c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il}) p_j(n_{jm}) + \sum_{m=1}^{L_j} c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il}) \sum_{m=1}^{L_j} p_j(n_{jm}) q_j(n_{jm})}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})}$$

$$= -\left[q_i(n_{il}) + \sum_{u_j \in V_i} \frac{\sum_{m=1}^{L_j} c(u_j, n_{jm}, u_i, n_{il}) \left(p_j(n_{jm}) - \boldsymbol{p}_j \cdot \boldsymbol{q}_j \right)}{|V_j| \sum_{m=1}^{L_j} Q_j(n_{jm})} \right].$$

Apéndice B.Un ejemplo ilustrativo de los cálculos de $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$, $Q_{ij}(n_{il})$, $Q_i(n_{il})$ y $q_i(n_{il})$



Sea el cuerpo de reconocimiento un poliedro y sean sus partes visibles tres lados que corresponden a los nodos u_1, u_2 y u_3 del grafo del modelo. A cada nodo están vinculados otros dos nodos y se expresa como $V_1 = \{u_2, u_3\}, V_2 = \{u_1, u_3\}, V_3 = \{u_1, u_2\}$. Las relaciones entre dos nodos se definen por un ángulo entre normales a cada lado. Los ángulos entre u_1 y u_2, u_1 y u_3, u_2 y u_3 son α, β y γ respectivamente, $\alpha \neq \beta, \alpha \neq \gamma, \beta \neq \gamma$.

Los datos iniciales son los valores de las coordenadas tridimensionales de las superficies visibles. Como resultado del procesamiento de los datos iniciales, fueron seleccionados tres candidatos a elementos estructurales S_1, S_2 y S_3 y la marca estocástica inicial de los nodos u_1, u_2 y u_3 tiene probabilidades iguales para cada candidato: $p_i^{(0)} = (1/3, 1/3, 1/3,)$, $i = 1,2,3$. Esto significa que a cada nodo del grafo están prescritos tres candidatos y: $n_{i1} = S_1$, $n_{i2} = S_2$ y $n_{i3} = S_3$, $i = 1,2,3$.

Los valores de $c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$, $i = 1, 2, 3$, $j = 1,2,3$, $l = 1,2,3$, $k = 1,2,3$ están representados en forma de tabla. Si los ángulos entre los candidatos a elementos estructurales S_1 y S_2, S_1 y S_3, S_2 y S_3 son α, β y γ respectivamente, entonces tenemos:

$c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})$

i = 1, j = 2

l \ k	1	2	3
l	0	1	0
2	1	0	0
3	0	0	0

i = 1, j = 3

l \ k	1	2	3
1	0	0	1
2	0	0	0
0	1	0	0

i = 1, j = 1

l \ k	1	2	3
l	0	1	0
2	1	0	0
3	0	0	0

i = 2, j = 3

l \ k	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	1
0	0	1	0

i = 3, j = 1

l \ k	1	2	3
l	0	0	1
2	0	0	0
3	1	0	0

i = 3, j = 2

l \ k	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	1
0	0	1	0

$$Q_{ij}(n_{il}) = \sum_{k=1}^{L_j} c(u_i, n_{il}, u_j, n_{jk})\, p_j(n_{jk}),$$

$$Q_i(n_{il}) = \frac{1}{|V_i|} \sum_{u_j \in V_i} Q_{ij}(n_{il}) \quad q_i(n_{il}) = \frac{Q_i(n_{il})}{\sum_{l=1}^{L_i} Q_i(n_{il})}$$

$$p_j(n_{jk}) = \frac{1}{3}, \quad j = 1,2,3,\ l = 1,2,3,\ k = 1,2,3, \quad |V_i| = 2,\ i = 1, 2, 3.$$

$$Q_{12}(n_{11}) = \frac{1}{3}; \quad Q_{13}(n_{11}) = \frac{1}{3}; \quad Q_1(n_{11}) = \frac{1}{3};$$

$$Q_{12}(n_{12}) = \frac{1}{3}; \quad Q_{13}(n_{12}) = 0; \quad Q_1(n_{12}) = \frac{1}{6};$$

$$Q_{12}(n_{13}) = 0; \quad Q_{13}(n_{13}) = \frac{1}{3}; \quad Q_1(n_{13}) = \frac{1}{6};$$

$$q_1(n_{11}) = \frac{1}{2}; \quad q_1(n_{12}) = \frac{1}{4}; \quad q_1(n_{13}) = \frac{1}{4};$$

Por analogía:

$$q_2(n_{11}) = \frac{1}{4}; \quad q_2(n_{12}) = \frac{1}{2}; \quad q_2(n_{13}) = \frac{1}{4};$$

$$q_3(n_{11}) = \frac{1}{4}; \quad q_3(n_{12}) = \frac{1}{4}; \quad q_3(n_{13}) = \frac{1}{2}.$$

Bibliografía

1. Rybak, Y. I.

1990 Recognition of 3-D bodies and scenes, Proc. I Intern. Conf. on Information Technologies for Image Analysis and Pattern Recognition, Lviv, Vol. 1, 90-93.

2. Faugeras, O. D., Berthod, M.

1981 Improoving consistency and reducing ambiguity in stochastic labeling: an optimization approach, IEEE Transaction on Pattern Analisis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-3, No. 4.

3. Faugeras, O. D., Price K. E.

1981 Semantic description of aerial images using stochastic labeling, IEEE Transaction on Pattern Analisis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-3, No.6, November.

4. Rybak, V. I.

1989 Utilización de conocimientos no visuales en el proceso de percepción visual, análisis y descripción del medio ambiente de robot, Memorias de IV Conf. Nacional en los Métodos de Reconocimiento de Patrones, Riga, Parte 3, 83-85 (en ruso).

5. Rybak, V. I.

1987 Procesos Informativos de Robots Autónomos, Obras del Cuarto Conferencia de la Unión Soviética en los Sistemas Robóticas, Kiev, (en ruso)

6. Krot, V. M.

1988 Desarrollo y investigación de métodos de definición automática de coordenadas espaciales de superficies por imágenes estereoscópicas en fotogrametría y robótica, PhD Tesis, Instituto de Cibernética, Kiev.

7. Kanade, T.

1994 Development of a video-rate stereo machine, Proceedings of 94 ARPA Image Understanding Workshop, Nov. 14-16, Mottey Ca., 549-558.