

„ART Simulator V1.0” – апликациони софтвер базиран на *Adaptive Resonance Theory* –  
ART-1 вештачкој неуронској мрежи

Зоран Миљковић<sup>1</sup>, Иван Б. Лазаревић<sup>2</sup>, Бојан Бабић<sup>3</sup>

## 1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Развијени софтвер припада области машинства и индустријског софтвера, а директно се односи на развој и примену вештачке интелигенције (Листа ИР елемената у области развоја софтвера под бр. (7) - вештачка интелигенција; Извор: *Frascati Manual*, OECD), тачније ART-1 вештачке неуронске мреже, у домену идентификације објеката снимљених камером, као и пројектовања групне технологије и селуларних технолошких процеса. Зна се да је висок ниво аутоматизације [1], као и флексибилност која се остварује применом нумерички управљаних система, довео до реафирмације и даљег развоја групне и типске технологије [3,10]. У складу са тим, концепт групне технологије, заснован на класификацији делова у групе и фамилије према геометријској и технолошкој сличности са циљем да се технологија пројектује само за типске захвате, представља се у овом извештају кроз нови приступ оријентисан ка примени ART-1 вештачке неуронске мреже [1,7,12,14,15,17]. Дакле, биће приказана примена ART-1 вештачке неуронске мреже при грубом пројектовању технолошких процеса за групу осносиметричних цилиндричних делова [1,14,15,17], а то је резултирало развојем предметног софтвера за машинско учење интелигентних система под називом „ART Simulator V1.0” оствареног у *Visual Basic*<sup>®</sup> окружењу [18]. Софтвер „ART Simulator V1.0” обезбеђује реализацију новог приступа у оквиру процедуре за пројектовање групне технологије где ART -1 вештачка неуронска мрежа исказује способност да разврстава бинарне векторе у кластере, односно у овом случају у групе делова, и то према геометријској и технолошкој сличности. Процедура која се у наставку представља, указује на то да су запажене очигледне предности новог приступа базираног на ART-1 вештачкој неуронској мрежи у односу на конвенционалан, пре свега у погледу аутоматизованог пројектовања технолошких процеса [16]. Поред ове примене евидентна је и успешна реализација идентификације објеката снимљених камером која је остварена коришћењем софтвера „ART Simulator V1.0” [1,2,13].

Софтвер „ART Simulator V1.0” се такође успешно користи и у додипломској настави у оквиру предмета: *Компјутерска симулација и вештачка интелигенција (BSc)*, *Методе одлучивања (MSc)* и *Интелигентни технолошки системи (MSc)*, као и за последипломце-магистранте и докторанте у изради магистарских теза и докторских дисертација, а од школске 2008/09. године користи се и на докторским студијама (на енглеском језику) на Машинском факултету у Београду.

## 2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

Интелигентни технолошки системи (ИТС) представљају стратешку базу развоја производног инжењерства, а вештачке неуронске мреже се попут ART-1, као њихов интегрални део, интензивно користе за остваривање све већег удела аутономних система у производним технологијама [4], као што су процесирање нумеричких података добијених од система препознавања са циљем да се оствари идентификација снимљеног објекта-радног предмета, односно са друге стране у аутоматизованом пројектовању технолошких процеса заснованом на принципима групне технологије, што ће у наставку бити објашњено. У најкраћем, предложена процедура [1] којој припада и сегмент који се односи на одређивање сличности међу деловима применом ART-1 вештачке неуронске мреже, састоји се у следећем:

1. технолошко препознавање и класификација делова,
2. одређивање хипотетичког или реалног комплексног репрезентанта класе делова,
3. утврђивање геометријске и технолошке сличности и формирање група или фамилија делова,
4. грубо пројектовање технолошког поступка за издвојене групе или фамилије делова,
5. фино пројектовање технологије за типске захвате, базирано на свему од 1-4.

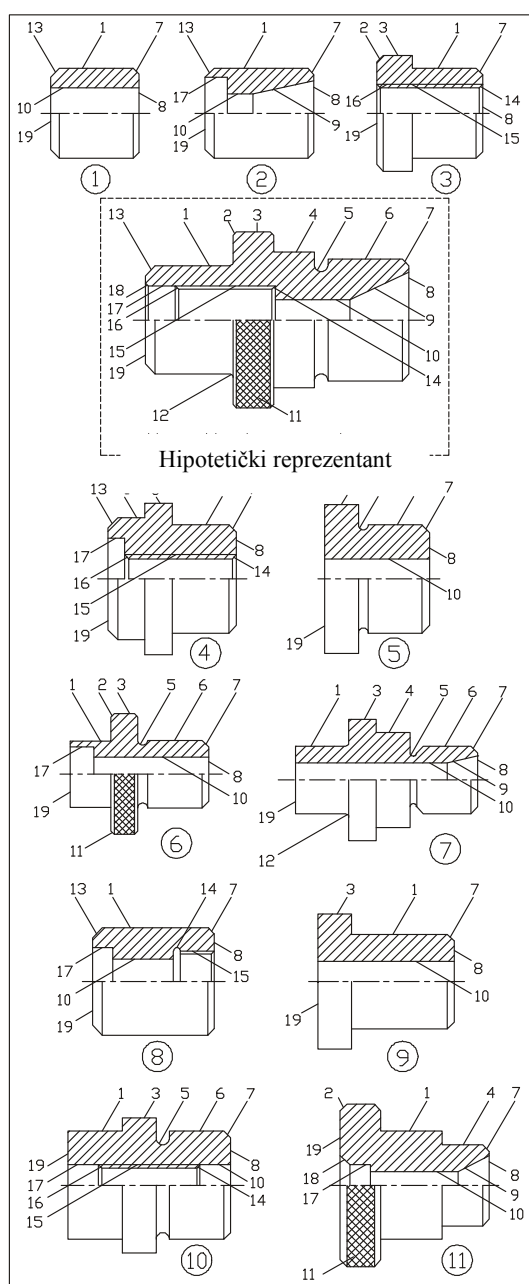
<sup>1</sup> Ванредни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет. [zmiljkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:zmiljkovic@mas.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Истраживач-сарадник, „ECOLAB Hygiene“, д.о.о., Београд. [atlant@ptt.rs](mailto:atlant@ptt.rs)

<sup>3</sup> Редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет. [bbabic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbabic@mas.bg.ac.rs)

Примена ART-1 неуронске мреже у иницијалној фази пројектовања групне технологије подразумева технолошку класификацију делова на основу сличности међу њима. Захваљујући могућностима ART-1 неуронске мреже у погледу генерализације и утврђивања степена сличности између бинарних вектора који се у фази компетитивног учења пропуштају кроз мрежу овај приступ је могућ, јер својом самоорганизованашћу она обезбеђује идентификацију и класификацију делова у групе или фамилије. Процедурално посматрано, ART-1 неуронска мрежа је у стању да, на основу оптималног параметра сличности  $\rho$ , одреди припадност сваког новог дела одговарајућој групи или фамилији, с обзиром да нема меморијског губитка претходно извршених класификација.

Елаборација развијене процедуре идентификације и класификације делова, базирана на ART-1 мрежи, почиње од одређивања комплексног репрезентанта одговарајуће групе делова. Репрезентант групе има све геометријске елементе сваког од делова у групи и може бити *реалан* или *хипотетички*. Хипотетички репрезентант је генерисан на основу свих типских технолошких форми за издвојену класу делова који јој припадају. Овде ће се разматрати група осносиметричних цилиндричних делова, за коју је одређен комплексан део, односно њен репрезентант. На слици 1. је показана класа од једанаест издвојених делова и њен хипотетички репрезентант. Хипотетички репрезентант се састоји од 19 елементарних технолошких форми (у даљем тексту *елементарне површине* за обраду резањем), при чему је потребно уочити да сваку од њих има бар један од издвојених делова.



Слика 1. Пример класе делова и хипотетичког комплексног репрезентанта

Табела 1. приказује матрицу која повезује сваки од делова изабране класе (слика 1.) са елементарним површинама, на основу чега се генеришу бинарни вектори делова који представљају улаз у ART-1 вештачку неуронску мрежу.

Табела 1. Матрица „машински део-елементарна површина”

Број дела	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Е л е м е н т а р н а  п о в р ш и н а	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	3	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
	4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
	6	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	9	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	10	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	12	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	13	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	14	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
	15	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
	16	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
	17	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

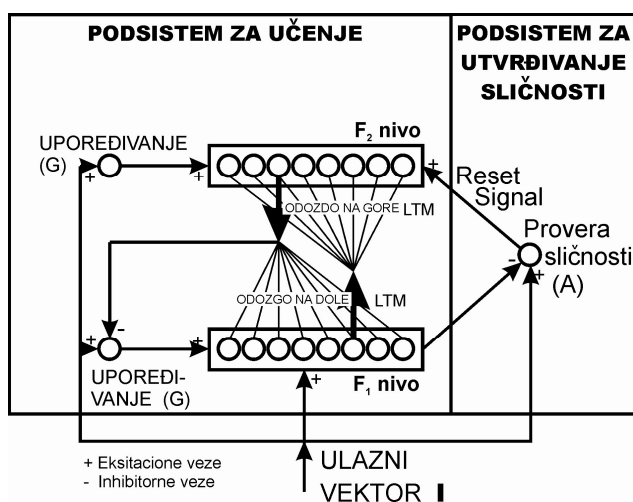
Поред проблема пројектовања групне технологије разматрана је и идентификација објеката снимљених камером. Наиме, развој софтвера за препознавање објеката снимљених камером, намењен за примену у реалним условима индустријских постројења представља комплексан проблем чије решење може да омогући ефикасније обављање одговарајућих процеса. Наиме, замислимо да треба да развијемо софтверско-хардверско решење које би требало да препознаје бар-кодове сировина, обрадака, производа итд. који се транспортују на одговарајућим тракастим транспортерима у индустријском окружењу (важно је напоменути да проблем не мора бити „ограничен” искључиво на производна окружења већ се може „проширити” и на пројектовање складишних капацитета, итд.). У сврху разврставања долазећег материјала у унапред познате класе неопходно је снимити слику камером, извршити њено процесирање, препознати бар-код (формиран од низа цифара; у наставку ће се видети реализација остварена коришћењем софтвера „ART Simulator V1.0”) и на основу тога спровести одговарајућу акцију (нпр. робот-манипулатор би приступио објекту и усмерио га на други тракасти транспортер [19]). Да би ово било успешно изведено неопходно је да се развије хардверско-софтверски систем препознавања који би био у стању да омогући успешно континуирано извршавање постављеног задатка.

Први корак у развоју овог система био би везан за софтвер који треба да процесира слику [1]. Област компјутерског (машинског) гледања је исувише широка за, макар и кратки, приказ у овом извештају, па ћемо из тог разлога претпоставити да је обрада слике извршена. Након обраде слике, неопходно је развити софтверско решење које ће препознавати и идентификовати објекте у континуитету и на тај начин вршити класификацију нпр. бар-кодова, а самим тим и посматраног материјала или дела.

## Теоријске основе проблема

ART-1 (Adaptive Resonance Theory) представља једну од вештачких неуронских мрежа које су намењене за тзв. ненадгледано машинско учење [4,7]. На слици 2. је дата структура ART-1 вештачке неуронске мреже. Да би се разумела ART-1 вештачка неуронска мрежа у наставку ће бити приказан основни алгоритам обучавања на чијим основама се врши модификација тежинских коефицијената [1,2] током

машинског учења. На основу датих објашњења у [1,2], могуће је процес машинског учења сумирати и презентирати, корак по корак, преко алгоритма за брзо учење ART-1 вештачке неуронске мреже који је представљен у наставку (алгоритам 1). Неоподно је нагласити да се он односи на бинарни улазни облик вектора, који ограничава његову примену. Поред општег (дат је у форми опште примењивог уобичајеног алгоритамског облика), алгоритам показује како ART-1 мрежа може да се искористи за идентификацију једноставног примера 2D слике објекта [1], представљеног помоћу бинарног вектора **I**.



Слика 2. Графички приказ структуре ART-1 вештачке неуронске мреже.

Алгоритам 1.

### Алгоритам за брзо учење ART-1 неуронске мреже

**Корак 1:** Одређивање величине улазног слоја  $F_1$  и конкуритивног слоја  $F_2$ . Нека је  $M$  број неурона у слоју  $F_1$  (за дати пример  $M = 48$  – видети у књизи [1]), а  $N$  број неурона у слоју  $F_2$  ( $N = 4$ ).

**Корак 2:** Иницијализација константних параметара:

$$A_i, C_i, D_i \geq 0$$

$$\max\{D_i, 1\} < B_i < D_i + 1 \rightarrow A_i = 1, B_i = 1.5, C_i = 5, D_i = 0.9, L = 3$$

$$L > 1,$$

и одређивање веома важног параметра сличности  $0 < \rho \leq 1 \rightarrow \rho = 0.9$ .

**Корак 3:** Иницијализација LTM-а, према следећим изразима за  $i = 1, \dots, M$ ;  $j = 1, \dots, N$ :

$$\text{- одозго на доле тежински односи: } z_{ij} > \frac{B_i - 1}{D_i} = \frac{1.5 - 1}{0.9} = 0.55 \rightarrow z_{ij} = 0.2 + 0.55 = 0.75$$

- одоздо на горе тежински односи:

$$0 \leq z_{ji} \leq \frac{L}{L - 1 + M} = \frac{3}{3 - 1 + 48} = 0.06 \rightarrow z_{ji} = 0.05$$

**Корак 4:** Иницијализација активације неурона у конкуритивном слоју  $F_2$  на вредност 0.0, а у улазном слоју  $F_1$  на вредност:

$$x_{ii}(0) = \frac{-B_i}{1 + C_i} = \frac{-1.5}{1 + 5} = -0.25$$

**Корак 5:** Увођење улазног вектора **I** у мрежу, преко улазног слоја  $F_1$ , тако да ће за 2D слику објекта активације неурона сада бити:

$$x_{ii} = \frac{I_i}{1 + A_i(I_i + B_i) + C_i} \rightarrow x_{ii}(I_i = 1) = 0.118 ; x_{ii}(I_i = 0) = 0$$

Дакле, за улазни вектор  $\mathbf{I}_1 = [0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, \dots, 1, 1, 0, 0]^T$ , вектор активације у  $F_1$  је:

$$\mathbf{X}_1 = [0, 0.118, 0, 0, 0.118, 0, 0, 0.118, \dots, 0.118, 0.118, 0, 0]^T$$

**Корак 6:** Израчунавање излазног вектора **S** за слој  $F_1$ :

$$s_i = h(x_{ii}) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } x_i > 0 \\ 0 & \text{ako je } x_i \leq 0 \end{cases} \rightarrow \mathbf{S} = [0, 1, 0, 0, 1, \dots, 1, 1, 0, 0]^T$$

**Корак 7:** Простирање излазног вектора  $\mathbf{S}$  одоздо на горе ка компетитивном слоју  $F_2$  и израчунавање активација неурона у  $F_2$ :

$$T_j = \sum_{i=1}^M s_i z_{ji} \rightarrow T = [0.9, 0.9, \dots, 0.9]^T$$

**Корак 8:** Одређивање победничког неурона у слоју  $F_2$  (ако су им активације исте, онда је то први с леве стране), који има излаз различит од нуле, односно вредност 1:

$$u_j = \begin{cases} 1 \rightarrow T_j = \max_k \{T_k\} \forall k \\ 0 \rightarrow \text{sve ostalo} \end{cases} \rightarrow \text{излазни вектор } \mathbf{U} = [1, 0, 0, 0]^T \text{ из слоја } F_2$$

**Корак 9:** Простирање трансформисаног излазног вектора  $\mathbf{V}$  из слоја  $F_2$ , одозго на доле назад ка слоју  $F_1$ :

$$V_i = \sum_{j=1}^N u_j z_{ij} \rightarrow V = [0.75, 0.75, \dots, 0.75]^T$$

**Корак 10:** Израчунавање нове активације у слоју  $F_1$ :

$$x_{li}^* = \frac{I_i + D_l V_i - B_l}{I + A_l (I_i + D_l V_i) + C_l} \rightarrow \mathbf{X}^* = [-0.123, 0.022, \dots, 0.022, -0.123, -0.123]^T$$

**Корак 11:** Одређивање новог излазног вектора за слој  $F_1$ ,  $\mathbf{S}^* = [0, 1, \dots, 1, 0, 0]^T$ , сходно кораку 6.

**Корак 12:** Одређивање степена подударности (сличности) између улазног вектора и новодобијеног облика:

$$M = \frac{|S^*|}{|I|} = \frac{\sum_{i=1}^M s_i}{\sum_{i=1}^M I_i} \rightarrow \text{за дати објекат је } M = 1 > \rho = 0.9 \text{ (идентификован је!!!)}$$

**Корак 13:** Поређење  $M$  са  $\rho$ . Ако је  $M < \rho$ , "маркира" се победнички неурон  $v_j$ , и тада он постаје неактиван, што значи да су сви излази из слоја  $F_2$  "нулирани", па је у овом случају неопходно вратити се на *корак 5*. Ако је  $M \geq \rho$ , остварено је *стање резонанце* (нема ресет сигнала од А – слика 2.) и следе *корази 14* и *15*.

**Корак 14:** Ажурирање тежинских односа одоздо на горе, само ка победничком неурону  $v_j$  у слоју  $F_2$ :

$$z_{ji} = \begin{cases} \frac{L}{L - 1 + |S^*|} & \text{ако је neuron } v_i \text{ активан} \\ 0 & \text{ако је } v_i \text{ неактиван} \end{cases}$$

**Корак 15:** Ажурирање тежинских односа одозго на доле, само од победничког неурона  $v_j$  ка свим неуронима у слоју  $F_1$ :

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ако је neuron } v_i \text{ активан} \\ 0 & \text{ако је neuron } v_i \text{ неактиван} \end{cases}$$

**Корак 16:** Ресетовање свих неактивних неурона у слоју  $F_2$ , увођење новог улазног вектора и повратак на *корак 5*.

*Подсистем за утврђивање сличности* ART-1 вештачке неуронске мреже (слика 2.), има задатак да, уз динамичке једначине за које су битна њихова асимптотска решења [1], установи степен подударности узорака који се доводе у мрежу, као и да преко *ресет-процеса* реактивира компетитивни слој  $F_2$ . Овај подсистем чини само један процесирајући елемент, неурон А, са једним излазом ка сваком неурону у слоју  $F_2$ . Улази ка А су генерисани од излаза сваког од неурона слоја  $F_1$ , односно од вектора  $\mathbf{S}$ , као и од улазног вектора  $\mathbf{I}$ . Тежински односи који су остварени од улазног вектора  $\mathbf{I}$  су сви једнаки и дефинисани преко вредности  $P$ , док су тежински односи за све везе од неурона слоја  $F_1$  такође једнаки и означени са  $-Q$ . Дакле, тада је сумирани улаз у А одређен преко  $P|I| - Q|S|$ , а излаз из А постоји само ако су сумирани улази већи од нуле, односно  $P|I| - Q|S| > 0$ , или  $P|I| > Q|S|$ , тј.  $P/Q > |S|/|I|$ . Количник  $P/Q$  се зове *параметар сличности* и обично се означава симболом  $\rho$ . Активација процесирајућег елемента А је спречена ако је  $|S|/|I| \geq \rho$ , на основу чега се изводи закључак да за *параметар сличности* важи услов да је  $\rho \leq 1$ . Такође је битан и услов да је  $P \leq Q$ . Наиме, параметар  $\rho$  представља мерљиву величину степена сличности, на основу кога систем ART-1 неуронске мреже врши дискриминацију између различитих класа улазних вектора, односно узорака. Овај параметар заправо одређује „пропустљивост” (врши филтрацију), са којом се извршава класификација улазних вектора у ART-1 неуронској мрежи. Тако, за дате узорке које треба класификовати, веће вредности параметра  $\rho$  резултирају финијом дискриминацијом између класа у односу на мале вредности параметра  $\rho$ . Након овог кратког приказа механизма машинског учења ART-1 вештачке неуронске мреже могуће је дати решење постављеног проблема.

### 3. НЕНАДГЛЕДАНО МАШИНСКО УЧЕЊЕ ПОМОЋУ ART-1 НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ - ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ У СВЕТУ

Анализа слике, код хијерархијског интелигентног управљања аутономног индустријског робота, подразумева и идентификацију објеката, што се може остварити поступком поређења са објектом који се „тражи”. Поређење објекта, за који је формиран бинарни вектор  $\mathbf{I}$ , са објектом који се тражи, у оквиру спроведених експеримената [1], се реализује коришћењем ART-1 вештачке неуронске мреже. Процедура је слична конвенционалном поређењу преко шаблона, с тим што се сличност међу објектима одређује кроз компетитивно обучавање ART-1 неуронске мреже [1,2,4,5,6,7,8,9]. Тако се ART-1 мрежа специјализује за одређену групу улаза и постаје детектор одговарајуће класе узорака, унутар које се остварује идентификација. Основна предност компетитивног обучавања се огледа у оспособљавању ART-1 неуронске мреже да врши једноставну класификацију улазних варијанти у функцији идентификације објеката, а у спроведеним експериментима је такво поређење улазних бинарних вектора  $\mathbf{I}$  са одговарајућим параметром сличности  $\rho$ , дато у једначини (1) преко степена подударности  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{M} = \frac{|\mathbf{S}^*|}{|\mathbf{I}|} = \frac{\sum_{i=1}^{6400} S_i}{\sum_{i=1}^{6400} I_i} \geq \rho \quad (1)$$

где је  $\mathbf{S}^*$  прототипски облик (излазни вектор-шаблон) за поређење са улазним бинарним вектором  $\mathbf{I}$ .

Практично се улазни бинарни вектор објекта ( $\mathbf{I}$ ), који је формиран после процесирања слике, пропушта кроз ART-1 неуронску мрежу помоћу које се одређује сличност са траженим објектом. Објекат може да буде у ма којој оријентацији, јер ART-1 неуронска мрежа одређује сличност преко бинарног вектора, који може да презентира било коју оријентацију [7,13]. Предност оваквог поступка је очигледна, а посебно је значајна са аспекта брзине и поузданости идентификације објекта.

Друга примена, везана за аутоматизовано пројектовање групе технологије, може се свести на следеће:

- лакше је идентификовање геометријске сличности између делова у групи,
- експлицитно означавање нових делова у групи или фамилији у свакој будућој класификацији је рачунарски оријентисано.

Без сувишних објашњења новог приступа треба нагласити ко је и када дао полазишта за вишедеценијски развој принципа групе технологије. Група технологија је први пут поменута још давне 1920. године, када је *Frederick Taylor* представио тај концепт у САД [3,10]. Он је понудио тада потпуно нову идеју о класификацији машинских делова који захтевају специјалне обрадне процесе, а које је, сходно томе, разврставао у одговарајуће групе. Према његовим сазнањима, а то је у нешто измењеној форми и данашња одредница, група технологија је производна филозофија која укључује идентификовање и груписање делова који имају сличности у фази конструисања и/или у фази производње у складу са одговарајућом пројектованом производном процедуром [10]. Дакле, групе делова или фамилије морају бити идентификоване и одређене на основу критеријума, а то је могуће остварити коришћењем неке од следеће три методе [1,3,10]:

1. Груписање делова према геометријској и технолошкој сличности.
2. Груписање делова према сличности технолошких процеса.
3. Класификација и кодирање делова.

Данашњи, најчешћи приступ концепту групе технологије подразумева примену структурне класификације и система кодирања који је базиран на сличности делова. Међутим, уочени су проблеми приликом класификације и кодирања, тако да је на Катедри за производно машинство Машинског факултета у Београду [1,14,15,17] предложена процедура која се односи на иницијално формирање групе или фамилије делова аутоматизованим поступком идентификације геометријске сличности делова коришћењем ART-1 неуронске мреже, на основу које је затим могуће пројектовати заједнички технолошки поступак производње делова на основу њихове технолошке сличности. Дакле, процедура која се у наставку презентира, односи се на верификацију идеје да се машински делови могу иницијално груписати, слично поступку који би сваки пројектант групе технологије прво применио, а то је визуелна сличност, с тим што је овде понуђен аутоматизован и експлицитан поступак аутоматизоване идентификације пре свега геометријске сличности, али и технолошке (у иницијалној фази пројектовања) међу издвојеним деловима.

#### 4. СУШТИНА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА – ПРИМЕНА И ПРИКАЗ СОФТВЕРА „ART Simulator V1.0”

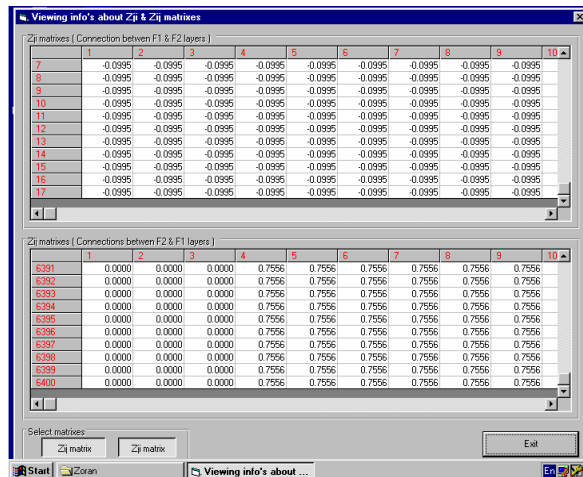
„ART Simulator V1.0” је експериментални софтвер сопственог развоја [1,2], а остварен је програмирањем у *Visual Basic*<sup>®</sup>-у [18]. То је проблемски оријентисан апликациони софтвер који реализује описану процедуру идентификације [1,7,13], а основни прозор је приказан на слици 3. Улазни слој  $F_1$  ове мреже има 6400 неурона када се користе објекти које треба да идентификује „ART Simulator V1.0” (80x80 пиксела је величина улазног вектора  $I$ , а то је условљено дефинисаном подоблашћу слике од  $M \times N$  пиксела), а компетитивни слој  $F_2$  има 17 неурона, односно 19 неурона, што одговара броју обучавајућих бинарних слика [1]. За параметар сличности  $\rho$ , ART-1 неуронска мрежа је најчешће после 2 до максималних 4 итерација идентификовала објекте. Степен подударности  $M$  је најчешће био 1, ретко нешто већи од параметра сличности  $\rho$ , који је одређен да буде 0.9. Брзина идентификације је била готово тренутна, тако да се овим поступком решава основни проблем који је присутан код конвенционалних процедура поређења, везан за брзину и тачност идентификације.



Слика 3. Идентификација објекта помоћу софтвера „ART Simulator” - основни прозор

Параметри ART-1 неуронске мреже, који су приликом идентификације објеката коришћени, су у складу са 2D сликама објеката и одговарајућом процедуром базираном на датом алгоритму 1. машинског учења. Сетовање свих параметара и константи које учествују у току учења ART-1 мреже, се остварује веома једноставно и као што се види на слици 3. налазе се у блоку у горњем делу основног прозора. Улазни бинарни вектор, који се доводи на  $F_1$  слој ART-1 неуронске мреже и дефинише број неурона у том слоју, може да има већи број чланова, тако да је експериментални софтвер „ART Simulator V1.0” ограничен на максималних 10 000 неурона у слоју  $F_1$ . Јасно, тај број може лако да се увећа, ако би нека друга апликација то захтевала. Максимална ширина иницијалне области 2D слике  $W$ , као и висина  $H$ , за сваки од објеката који су у току извођења експеримената учествовали у идентификацији, износила је 400 пиксела. Дакле, с обзиром на то да је поменути фактор редукције резолуције 2D слике у спроведеним експериментима био одређен као  $\eta=5$ , то је мрежа пиксела  $W \times H$  уместо 160 000 пиксела била сведена на мрежу  $M \times N$  од 6400 пиксела. Што се тежинских односа  $z_{ji}$  и  $z_{ij}$  тиче, они су иницијализовани сходно објашњеном алгоритму учења (Алгоритам 1.), и то коришћењем константних параметара:  $A1=1$ ,  $B1=1.5$ ,  $C1=5$ ,  $D1=0.9$ ,  $L=3$  (у спроведеним експериментима, у погледу брзине учења, ове вредности су биле оптималне), који су приказани на слици 4.

У контексту аутоматизованог пројектовања групне технологије, за иницијалну матрицу приказану у табели 2, уз описану процедуру и параметар сличности  $\rho=0.72$ , коришћењем развијеног и у овом извештају представљеног софтвера „ART Simulator V1.0”, генерисана је матрица груписаних делова (слика 5). Ова матрица показује да геометријску, па сходно њој и значајну технолошку сличност, имају делови 3,4 и 10. Сличан закључак се намеће и за делове 6,7 и 11, као и 8,2 и 1, односно 9 и 5. Финална матрица, добијена после машинског учења ART-1 неуронске мреже, показује да су формиране четири групе делова за изабрану класу (слика 5).



Слика 4. Вредности тежинских односа  $z_{ji}$  и  $z_{ij}$  – екрански приказ „ART Simulator”-а

		Д Е Л О В И										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Е												
Л	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Е	17		1		1		1		1		1	1
М	3			1	1	1	1	1		1	1	
Е	10	1	1			1	1	1	1	1	1	1
Н	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Т	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
А	19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Р	5					1	1	1			1	
Н	6					1	1	1			1	
Е	14			1	1				1		1	
	15			1	1				1		1	
П	16			1	1						1	
О	2			1			1					1
В	4				1			1				1
Р	9		1					1				1
Ш	13	1	1						1			
И	11						1					1
Н	12							1				
Е	18											1

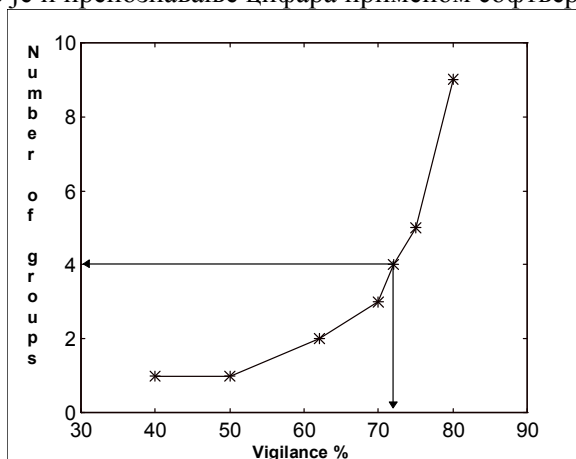
		Д Е Л			О В И							
		3	4	10	6	7	11	8	2	1	9	5
Е												
Л	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Е	17		1	1	1	1	1	1	1			
М	3	1	1	1	1	1	1				1	1
Е	10		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Н	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Т	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
А	19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Р	5			1	1	1						1
Н	6			1	1	1						1
Е	14	1	1	1				1				
	15	1	1	1				1				
П	16	1	1	1								
О	2	1			1		1					
В	4		1			1	1					
Р	9					1	1		1			
Ш	13							1	1	1		
И	11				1		1					
Н	12					1						
Е	18						1					

Слика 5. Финална матрица груписаних делова

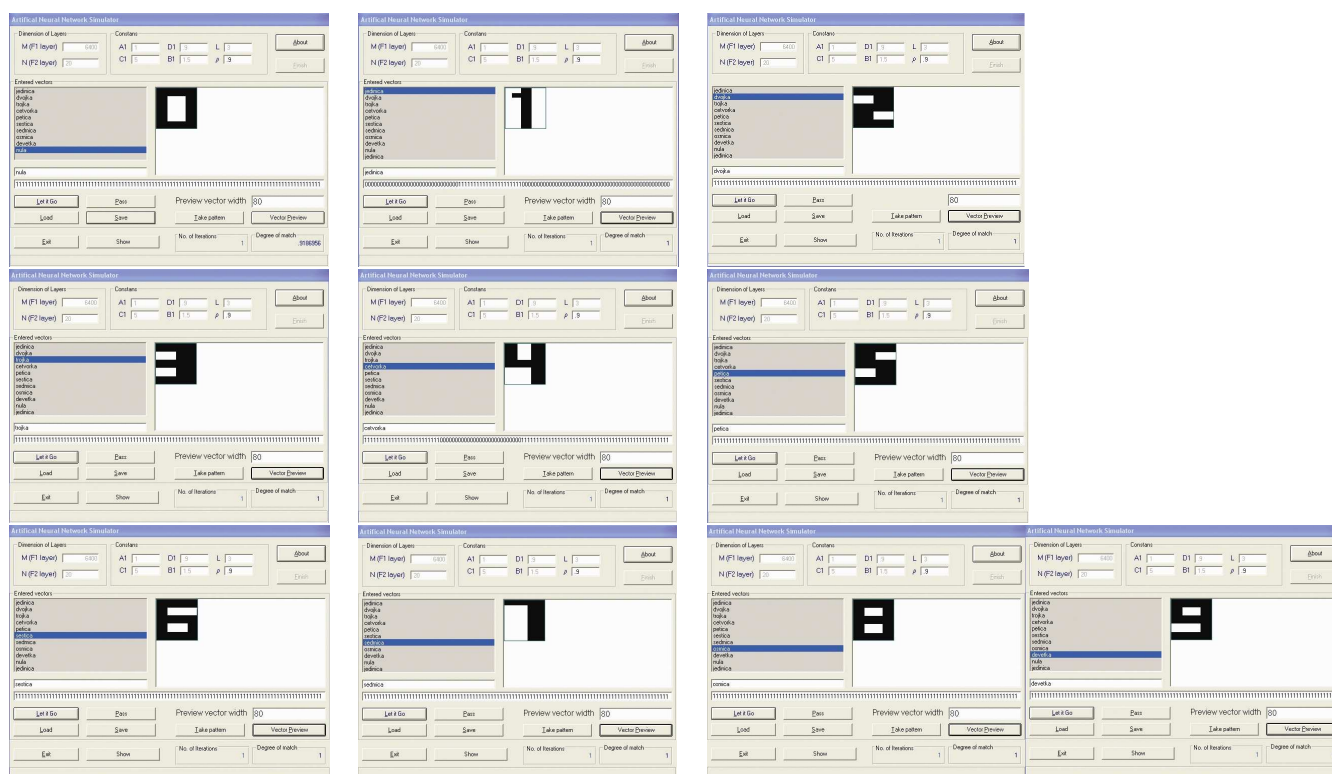


Поред резултата везаних за број генерисаних група делова, неопходно је дати додатна објашњења у вези са параметром сличности  $\rho=0.72$ . Наиме, ова вредност је варирана и на слици 6. су показани резултати. Очигледно је да оптималну вредност параметра сличности није могуће увек лако утврдити, јер је евидентна корелација и сигнификантност класификације при груписању делова на основу параметра  $\rho$ . Веће вредности овог параметра условљавају да ће бити издвојено више група делова са мањим бројем делова и великом сличношћу између делова у групи. Мање вредности резултирају мањим бројем група са већим бројем делова у групи.

Поред показаног, остварено је и препознавање цифара применом софтвера „ART Simulator” (слика 7) [2].



Слика 6. Утицај параметра сличности  $\rho$  на формирање група делова



Слика 7. Приказ свих цифара за које је ART -1 вештачка неуронска мрежа обучена

## 5. ЗАКЉУЧАК

Треба нагласити у закључку да су, захваљујући софтверу „ART Simulator V1.0” и његовој универзалности у домену примене алгоритма учења ART-1 вештачке неуронске мреже, остварени и пратећи истраживачки резултати који су имали посебан значај у току касније верификације постављене хипотезе о могућности учења аутономног индустријског робота на основу информација које добија од екстерног сензора-камере [1,2]. Наиме, тестиран је приказани алгоритам за брзо учење ART-1 неуронске мреже на примеру идентификације геометријске сличности оносиметричних цилиндричних машинских делова, која је веома битна за иницијално класификовање тих делова у оквиру реализације групне

технологије. Показало се да је код ове примене ART-1 неуронске мреже, идентификација одговарајућих класа, односно група делова, била веома ефикасна, тако да је на тој једноставнијој примени тестирана брзина идентификације базирана на алгоритму учења, објашњеном у поглављу 2. овог извештаја. Практично се, тек после ове верификације, ART-1 неуронска мрежа могла касније успешно искористити и за сложенији проблем идентификације објеката снимљених камером [1,2].

У оквиру пројекта TP-14031 [19] разматрана је интеграција робота у производно оријентисаном окружењу у циљу побољшања транспорта и манипулације материјала, сировина и готових делова [2]. Даљи развој индустријских робота, са циљем очекиване примене за потребе манипулације сировина, материјала и готових делова у оквиру интелигентног технолошког система производно оријентисане компаније, омогућио би ефикасније обављање основних технолошких задатака погодних за роботизацију, тако да су могућности које поседује предметни софтвер „**ART Simulator V1.0**” искоришћене за пројектовање групне технологије и идентификацију снимљених објеката кроз реализоване активности пројекта TP-14031 [19].

На крају овог извештаја, важно је истаћи остварену примену развијеног софтвера „**ART Simulator V1.0**” у образовне сврхе, као помоћног наставног средства за извођење лабораторијских вежби, на свим нивоима академских студија *Модула за производно машинство* Машинског факултета у Београду.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Миљковић,З.: Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама, Монографија, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2003.
- [2] Миљковић,З., Александрић,Д.: Вештачке неуронске мреже - збирка решених задатака са изводима из теорије, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2009.
- [3] El Wakil,S.D., *Processes and Design for Manufacturing*, Prentice Hall International, Inc., London,1989.
- [4] Carpenter,G.A.,Grossberg,S., A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 37, 54-115, Academic Press, 1987.
- [5] Freeman J. A., Skapura D. M.: *Neural Networks – Algorithms, Applications and Programming Techniques*, - Addison–Wesley Publishing Company 1991.
- [6] Freeman J. A.: *Simulating Neural Networks with Mathematica®*, - Addison–Wesley Publishing Co. 1994.
- [7] Dagli,C.H.,(editor), *Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing*, Chapman & Hall, 1994.
- [8] Haykin S., *Neural networks: A comprehensive foundation*, - MacMillan, NY 1994.
- [9] Skapura D. M.: *Building Neural Networks*, - Addison–Wesley Publishing Company 1996.
- [10] Nelson,D.H.,Schneider,G., *Applied Manufacturing Process Planning*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [11] Dreyfus G.: *Neural Networks – Methodology and Applications*, - Springer–Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [12] Miljković,Z., Application of ART-1 Neural Network in Group Technology Design, *AMSE Journal Advances in Modeling&Analysis*, Series D:Mathematical Tools,General Computer Tools,Vol.1 No.2, pp.1-16, France, 1998.
- [13] Miljković,Z., Lazarević,I., "ART-1 Simulator" for Identification of Objects in Robotics, *Proceedings of the International A.M.S.E. Conference on Contribution of Cognition to Modelling-CCM'98*, pp. 5.48-5.51, Lyon-Villeurbanne, France, July 1998.
- [14] Miljković,Z., Babić,B., Kalajdžić,M., Manufacturing Similarity Identification in Group Technology Design Based on the "ART-1 Simulator", *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN 2002) and EUREKA Partnering Event*, pp. 325-335, Greece, 2002.
- [15] Miljković,Z., Babić,B., Machine-Part Family Formation by Using ART-1 Simulator and FLEXY, *FME Transactions* (ISSN 1451-2092), New Series, Vol.33 No.3, pp. 157-162, University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering, 2005.
- [16] Babić,B., Nešić,N., Miljković,Z., A Review of Automated Feature Recognition with Rule-Based Pattern Recognition, *Journal Computers in Industry* (ISSN 0166-3615), Vol.59 (4), pp. 321-337, Elsevier, April 2008.
- [17] Miljković,Z., Babić,B., Application of "ART SIMULATOR" for Manufacturing Similarity Identification in Group Technology Design, *Chapter printed in scientific monography „Intelligent Production Systems Way to Competitiveness and Innovative Engineering“*, Edited by Valentina Gečevska, and Franc Čuš, Sts. Cyril and Methodius University – Faculty of Mechanical Engineering-Skopje, Macedonia & University in Maribor – Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia (ISBN 978-9989-2701-4-7), Chapter 10, pp. 119-131, June 2009.
- [18] Visual Basic 5.0, Enterprise edition, *Microsoft Corporation*, 1997.
- [19] Бабић,Б., Миљковић,З., Бојовић,Б., Вуковић,Н., Флексибилна аутоматизација и имплементација интелигентних технолошких система у домену производње делова од лима, Пројекат технолошког развоја који финансира Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије: TP-14031, Београд, 2008-10.