

önállóan, részben társszerzőkkel (többek között Borgefors-szal és Tijdemannal) közösen értük el.

Az alábbiakban összefoglaljuk a beszámolás alá eső kutatási időszakban a pályázat témakörében nyert eredményeinket, tematikus bontásban. Célunk minden érintett területen hozzávetőlegesen felvázolni és összegezni az általunk a beszámolási időszakban végzett munkát, az egyes különálló dolgozatok adatai a publikációs listánkon rendelkezésre állnak.

### Szomszédsági szekvenciák.

A szomszédsági szekvenciák elmélete lényegében Rosenfeld és Pfaltz egy alapvető, közel negyven éve született dolgozatáig nyúlik vissza. Ezek a szekvenciák rendkívül fontos szerepet játszanak többek között a különböző diszkrét struktúrákon (például különböző rács típusokon) történő mozgások leírásakor, illetve az euklideszi metrika digitális távolságokkal való közelítésekor. A témakör elméleti eredményei sokszor közvetlen gyakorlati alkalmazással is rendelkeznek. Ennek fényében nem meglepő, hogy a témakör irodalma rendkívül gazdag, számos szerző és kutatócsoport foglalkozik különböző, a szomszédsági szekvenciák elméletével kapcsolatos problémák vizsgálatával, illetve az eredmények gyakorlati alkalmazási lehetőségeinek feltárásával.

A beszámolási időszakban végzett tudományos tevékenységünk során részben korábbi kutatásainkhoz illetve eredményeinkhez kapcsolódva, a szomszédsági szekvenciák elméletét és gyakorlati alkalmazhatóságát több szempontból is vizsgáltuk. Eredményeinkről számos nemzetközi konferencián, workshopon illetve szócikkben számoltunk be.

A szomszédsági szekvenciák elméletét sikerült egy igen általános esetre kiterjesztenünk, jellemezve azon ún. végperiodikus szekvenciákat, melyek  $Z^n$ -en metrikát szolgáltatnak. Ezáltal Yamashita és Ibaraki korábbi alapvetőnek tekintett eredményeit jelentősen általánosítottuk és javítottuk.

Újszerű elméleti eredményeket értünk el a szekvenciák approximációs tulajdonságaival kapcsolatban. Többek között sikerült meghatároznunk az euklideszi metrikát felülről legjobban közelítő oktagonális metrikát, ezzel egyben Rosenfeld és Pfaltz egy régi problémájára is választ adva. Ezt az eredményünket (illetve a segítségével nyert „legjobban közelítő” metrikát) felhasználva sikerült egy, a korábbiaknál bizonyos szempontból pontosabb, hatékonyabb vázkijelölő algoritmust is kidolgoznunk (lásd a „Vázkijelölés” blokkot).

Leírtuk az oktagonális metrikus szomszédsági szekvenciák több analitikus, approximációs és strukturális tulajdonságát. Többek között megmutattuk, hogy metrikus szekvenciákban a szimbólumok mindegyikének létezik sűrűsége. Az elért elméleti eredmények több alkalmazását is adtuk.

Algoritmust és a korábbiaknál egyszerűbb formulát adtunk egy  $B$  szomszédsági szekvencia által meghatározott legrövidebb  $B$ -út előállítására, és vizsgáltuk a  $B$ -távolság metrikus tulajdonságait. Az ilyen irányú eredmények alapvető jelentőséggel bírnak a különböző metrikus és approximációs vizsgálatok során. A szomszédsági szekvenciák által generált távolságfüggvények speciális tulajdonságait kihasználva alkalmazást mutattunk az ezen az elméleten alapuló távolságszámításra színes képszegmentáló eljárásokban. Később ezt a megközelítést továbbfejlesztettük és részletesebben is kidolgoztuk. Ezen kívül modellt adtunk a szomszédsági szekvenciákon alapuló távolságmérés képi adatbázis lekérésekben való használatához. Megmutattuk, hogy ez a megközelítés a klasszikus eljárásoknál rugalmasabb lekérések készítésére is alkalmas. Ennek érdekében a szekvenciákkal történő lekérésekhez leíró nyelvtant és speciális szekvenciacsaldókat definiáltunk.

A képfeldolgozás számos területén gyakori a nem metrikus távolságfüggvények használata. Ehhez kapcsolódóan kutatásokat végeztünk a klasszikus nem metrikus Minkowski távolságfüggvények szekvenciákkal való approximálhatóságára. A közelítéshez újszerű elemként súlyozott szomszédságokon alapuló távolságfüggvények kombinációját használtuk. A távolságértékek meghatározásához hatékony algoritmusokat is megadtunk.

Leírtuk a szekvenciák geometriai viselkedését a háromdimenziós esetben. Ezzel együtt megadtunk egy, a magasabb dimenziós geometriai vizsgálatokhoz alapvetően szükséges formulát. Ez irányú eredményeink a korábbi idevágó (pl. Danielsson, illetve Das és szerzőtársai által elért) eredmények kiterjesztését is jelentik.

Korábbi saját és más szerzők eredményeit továbbfejlesztve, újabb elméleti eredményeket értünk el a szekvenciák hálóstruktúrájával kapcsolatban. Elemeztük számos szekvenciaosztály hálóelméleti struktúráját. Vizsgálatainkat tetszőleges dimenzióban elvégeztük, és figyelembe vettünk kombinatorikus szóelméleti szempontból fontos osztályokat is.

Több közleményben összefoglaltuk a szomszédsági szekvenciák képfeldolgozási eljárásokban (vázkijelölés, színes képek szegmentálása, képi lekérések) való alkalmazásának lehetőségeit, illetve a szükséges elméleti háttérrel. A szomszédsági sorozatokkal definiált távolságok egy új alkalmazását is bemutattuk (távolság-transzformáció).

A hagyományosnak mondható négyzet rácson kívül más ráctípusokon is több eredményt sikerült elérnünk. A háromszög rácson a fenti, négyzet rácokra vonatkozó vizsgálatokhoz hasonló kutatásokat folytattunk. Ebben az esetben is sikerült adnunk egy legrövidebb utat meghatározó algoritmust, valamint egy zárt távolságképletet, továbbá elvégeztük a digitális körök karakterizációját is. Ezen kívül a digitális kockarács és hatszög rác, valamint a háromszög rác kapcsolatából kiindulva felépítettünk egy háromszög rác-családot. Szimmetrikus koordináták segítségével sikerült leírunk a háromszög rác összes izometrikus transzformációját. Ezek a transzformációk számos gyakorlati képfeldolgozási problémánál fontos szerepet játszanak. A hatszög rác csúcspontjai közötti távolság metrikus tulajdonságait vizsgálva feltételt adtunk mind a háromszög-egyenlőtlenség, mind a szimmetria teljesülésére. Összehasonlítást végeztünk a négyzet-, a háromszög- és a hatszög rác távolságfüggvényei és azok tulajdonságai között. Formulát adtunk a távolságfüggvény kiszámítására a lapközepes-kocka rác (FCC), illetve a kockaközepes-kocka rác (BCC) esetén, továbbá kritériumot adtunk a távolság metrikusságára. Digitális gömbök vizsgálatával meghatároztuk az euklideszi távolságot legjobban közelítő szomszédsági sorozatokat ezen ráctípusokra. Az FCC és BCC rácokon is bemutattuk a szomszédsági sorozatokkal definiált távolságok távolság-transzformációra történő alkalmazásának lehetőségét.

### **Diszkrét tomográfia.**

Az adott irányok mentén zéró vonalösszegű egész elemű mátrixok struktúrájának jellemzését kiterjesztettük a klasszikus esetről az abszorpciós esetre. Ezt a jellemzést felhasználva a konvex halmazokra vonatkozó hasonló eredményt lényegesen általánosítva megmutattuk, hogy tetszőleges „elég nagy”  $n$ -hez található négy ún. érvényes irány, hogy egy  $n \times n$ -es digitális halmaz bármely részhalmazát az ebben a négy irányban számolt vonalösszegek egyértelműen meghatározzák. Felkérésre egy könyvfejezet formájában összefoglaltuk korábbi diszkrét tomográfiai eredményeinket. Emellett a már meglévő eredmények többféle kiterjesztését is adtuk, például fénytörés esetére vonatkozóan.

Adott sugarú kör lehetséges digitális képei függenek a rác és a kör kölcsönös helyzetétől. Megadtunk egy olyan algoritmust, amely a középpont helyének függvényében az  $r$  sugarú kör összes lehetséges digitális képét meghatározza. Eredményünk többek között a diszkrét tomográfia területén is rendelkezik bizonyos alkalmazásokkal.

### **Vázkijelölés.**

Közvetlen célunk elsősorban egy szomszédsági szekvenciákra alapuló újszerű vázkijelölő algoritmus kifejlesztése volt. Első lépésként sikerült egy olyan középtengely-transzformációt megadnunk, amely ilyen típusú szekvenciákat használ. A felhasználó megadhat egy metrikus szomszédsági szekvenciát, az algoritmus pedig a szekvencia által generált metrikát használva meghatározza az input bináris kép középtengelyét. Mivel a középtengely-transzformáció egy folytonos modellen alapul, a legjobb eredményt az euklideszi távolságot legjobban approximáló, valamely szomszédsági szekvencia által

generált távolságfüggvény adja. Az eljárás elméleti háttérét kutatócsoportunk egy eredménye szolgáltatta (lásd a „Szomszédsági szekvenciák” blokkot).

### **Orvosi képfeldolgozás, virtuális műtéttervezés.**

Közreműködtünk egy klinikai diagnosztikát segítő és műtétek tervezését lehetővé tevő, véges elemes analízisre támaszkodó számítógépes rendszer kialakításában. A rendszer egy fontos eleme az orvosi képek szegmentálása, ahol a szomszédsági szekvenciák használhatóságának vizsgálatára is lehetőségünk volt. A teljes rendszerrel új műtéti eljárások is tesztelhetők. A témával kapcsolatban több ismeretterjesztő kiadványt is készítettünk. Diszkrét matematikai módszerekre támaszkodva megvizsgáltuk a 3D-s vizualizációra, és ehhez kapcsolódóan a véges elemes analízisre és az ún. „rapid prototyping”-ra egyaránt alkalmas geometriai leírásokat. Egyes eredményeink hatékony implementációjára is sor került.

### **Multi-modális ember-gép kapcsolat.**

Az elmúlt évtizedben az élet számos területén megjelentek azok az eszközök, melyek arra szolgálnak, hogy a felhasználók hatékonyan jussanak információkhoz, szolgáltatáshoz, lehetőleg emberi beavatkozás nélkül. Ezeket a rendszereket összefoglaló néven információs rendszereknek nevezhetjük. Ezen rendszerek mindegyike saját felhasználói felülettel rendelkezik, melynek használatát a felhasználóknak el kell sajátítaniuk. Bár ezek a felületek valamilyen értelemben felhasználóbarátok és egy szabványosnak tekinthető kezelési módot próbálnak biztosítani a felhasználóknak, ennek ellenére eltérnek egymástól. Így az embereknek újra és újra el kell sajátítaniuk, hogyan kell kommunikálniuk egy számukra új rendszerrel. A multi-modális ember-gép kommunikációval foglalkozó kutatások egyik lényeges alapötlete az, hogy ahelyett, hogy minden esetben az emberek sajátítanak el a kommunikáció módját, olyan input/output interfészek kerüljenek kifejlesztésre, melyek lehetővé teszik, hogy az ember-ember típusú kommunikációhoz hasonló módon, emberi beszéddel, illetve az ezzel társult arci gesztusokkal tudjunk kommunikálni, és a választ emberi beszéd formájában kapjuk. A digitális képfeldolgozás szempontjából a kihívást a beviteli interfész részét képező, az arcon megjelenő gesztusok felismerése jelenti. Ez egy meglehetősen összetett feladat, amely több lépést is tartalmaz. Elsőként meg kell határoznunk a képen található arc geometriai elhelyezkedését („face detection”), majd annak sajátosságait figyelembe véve el kell döntenünk, hogy az irodalomban szokásos öt érzelmi kategória (semleges, vidám, szomorú, mérges, meglepődött) közül az arc melyikbe sorolható.

A pályázat keretében ezzel a problémával kapcsolatban a következő eredményeket értük el. Sikeresen kidolgoztunk egy olyan módszert, mely lehetővé teszi, hogy a fenti öt osztályba sorolható érzelmeket (az érzelmi típusoktól függően) legrosszabb esetben is 25%-os hibával felismerjük. Maga az algoritmus az ún. Support Vector Machine statisztikai tanuló algoritmusra épül. A felismerési ráta nagy részben annak köszönhető, hogy a jelenlegi adatbázis nem tartalmaz minden érzelmi kategóriához megfelelő képanyagot. Úgy gondoljuk, hogy megfelelő adatbázissal a felismerési ráta tovább javítható lesz, az algoritmus módosítása nélkül. Mivel a kifejlesztett algoritmus elméleti bonyolultsága kicsi, így az hatékonyan kódolható. Ez lehetővé teszi videófolyamok feldolgozását is, így az érzelmelek változása folyamatában követhető végig. Ennek következtében hosszabb idő alatt az egyes időpillanatokban felismert érzelmi kategóriák felhasználásával a felismerési arány javítható. Emiatt reményeink szerint az eljárás valódi alkalmazásokban is használható. A témában egy konkrét alkalmazás megvalósításán is dolgozunk, mely jó példa eddigi eredményeink bemutatására. A célkitűzés egy virtuális sakkozó létrehozása, aki képes a sakkozó arci gesztusainak felismerésével a virtuális játékost megszemélyesítő talking head közlései során az adott kommunikációs helyzetnek megfelelő érzelmi megnyilvánulások megjelenítésére. Bár a probléma összetett volta miatt még nem sikerült célunkat teljesen megvalósítanunk, a rendszer számos eleme már működőképes. Eredményeinkről több konferencia-előadásban és dolgozatban is beszámoltunk.

Végezetül megemlítenénk, hogy a pályázat témájához szorosan nem tartozó, de bizonyos szempontból rokon területeken (például formális nyelvek és automaták elmélete, gráfelmélet, operációs rendszerek elmélete) is több eredményt nyertünk.