

SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM

Fémkerámia kompozitok CT alapú geometriai rekonstrukciója

TDK dolgozat

Dorogi Gábor, Papp Szilárd

2013. 11. 14.

Tartalom

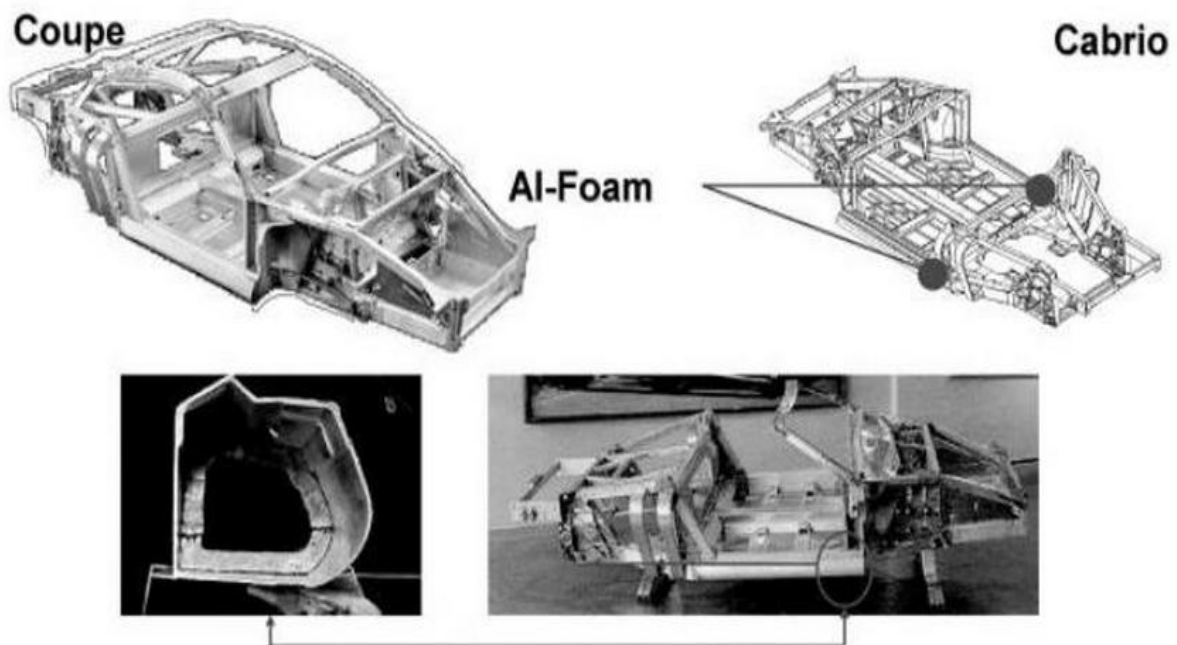
1. Bevezetés.....	4
2. Irodalomkutatás	7
2.1 Szintaktikus fémhab	7
A szintaktikus fémhabok anyagai	8
A szintaktikus fémhabok előállítása.....	8
2.2 Komputertomográf (CT)	9
2.3 Képfeldolgozó, kördetektáló algoritmusok	12
Hough transzformáció	12
Threshold algoritmus.....	13
Canny féle éldetektálás.....	15
Sobel operátor	16
Gauss élsimítás.....	16
InRange	17
OpenCV.....	17
2. 4. Problémafelvetés	17
2.4.1 Miért nem alkalmazhatók a meglévő szoftverek és algoritmusok erre a speciális feladatra?	17
2.4.2. Következtetés: Miért van szükség, saját algoritmusra vagy az eddigiek kiegészítésére?.....	19
3.1. Meglévő algoritmus kiegészítéseivel tervezett módszer	20
3.1.1. Szeletek	20
3.1.2. Hough Circle – Problémák és megoldások	21
3.1.3. Analízis.....	23
3.1.4 Adatbázis.....	24
3.1.5 Analízisek összehasonlítása – legnagyobb és legkisebb detektálható körök	24
3.1.6 A módszerből levonható következtetések	25
3.2 Saját algoritmus: tartományok körszerűségének módszere	26

A tartományok körszerűségén alapuló algoritmus működésének ismertetése	37
3.3. Rádiuszinkrementálás módszere	40
3.3.1. Belső körök	40
3.3.2 Rádiuszinkrementálás.....	41
3.3.3 Origó korrekció	42
3.3.4 A módszerből levonható következtetések	44
3.4 Összehasonlítás	45
4. Számítógépes modell generálása.....	46
5. Konklúzió	48
Köszönetnyilvánítás	48
Irodalomjegyzék.....	49

1. Bevezetés

A különböző fémhabokat, mint új mérnöki anyagokat az 1940-es évektől kezdődően fejlesztették. Az új szerkezetű anyagok megjelenését a természet ihlette, ahogy anyagok M. F. Ashby, cambridge-i egyetem professzora fogalmaz: *„Amikor a modern ember nagy teherbírású szerkezeteket épít, tömör anyagokat használ fel: acélt, betont, üveget. Amikor viszont a természet teszi ugyanezt, általában cellás – mondhatni lyukacsos – anyagokból építkezik: fából, csontból, korallból. Bizonyára jó oka van ennek.”*

A fémhabok kiemelkedő tulajdonsága a kis fajlagos tömeg, jó energiaelnyelő képesség. Kis tömegük ellenére kiváló a mechanikai szilárdságuk, valamint hő- és hangszigetelő képességük. Ezek a jellemzők, valamint a változatos alkalmazási lehetőségek okán a fémhabok az autóiipari kutatások egyik fókuszává váltak. Az első alkalmazásokra 2006-ig kellett várni: ekkor jelent meg az Audi Q7-ben az első fémhab alkatrész.



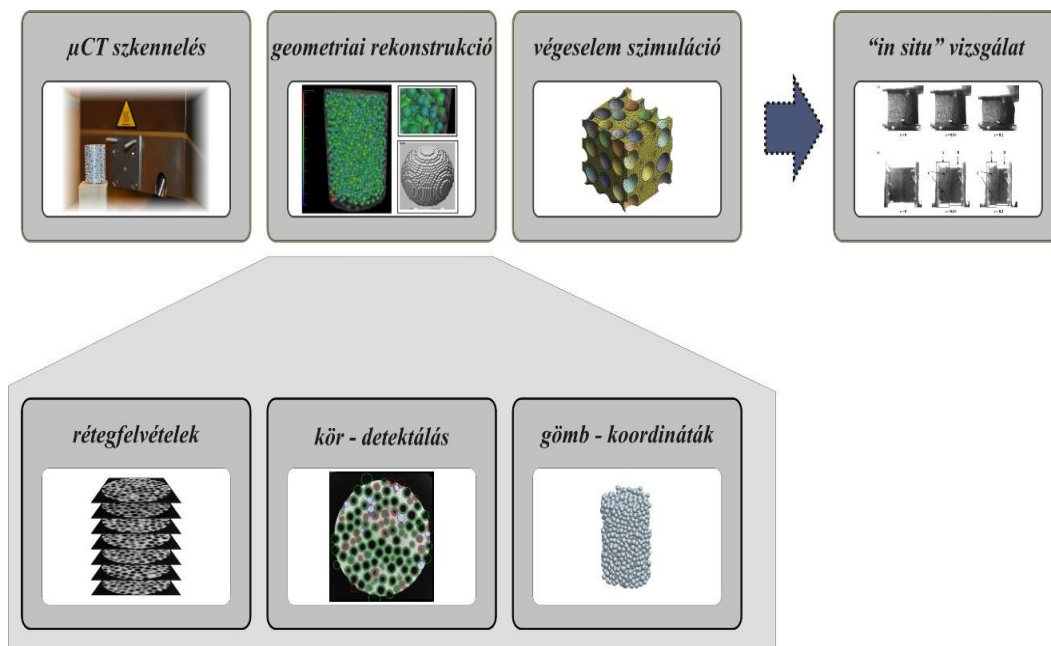
1.1. ábra: fémhab szerkezeti elem: Ferrari Spider 430 [1]

Napjainkban a fémhabok szerepe fokozatosan nő, egyre több szerkezeti elem készül, nem csak az autóipar számára. Néhány példa a teljesség igénye nélkül:

- katalizátorhordozók (nyílt cellás)
- akkumulátor betét (nyílt cellás Ni hab)
- daruk szerkezeti elemei (zárt cellás Al hab)
- lökhárító (zárt cellás Al hab)
- vonat ütköző (zárt cellás Al hab)
- biológiai implantátumok (nyílt és zárt cellás Ti hab)
- alagút belsejének borítása (zárt cellás Al hab)
- Ariane rakéta orrkúpja (zárt cellás Al hab)
- hadiipar (zárt cellás Al hab)
- hőcserélők (nyílt cellás Al hab)

A kifejlesztett alkatrészek mechanikai méretezéséhez leggyakrabban csak empirikus módon szerzett adatok állnak rendelkezésre. A termékek mechanikai jellemzőit jelentősen befolyásolja szerkezeti struktúrájuk. Amennyiben vizsgálni szeretnénk ezen anyagok hogy viselkednek terhelés során, vagy meg szeretnénk ismerni a tönkremeneteli folyamatot, akkor ismernünk kell az alkatrész pontos geometriai szerkezetét.

TDK dolgozatunkban a próbatest gyártásával induló és a véges elemes szimulációval végződő folyamat egy közötte részével foglalkozunk, a próbatest geometriai alakzat rekonstrukciójával. A speciális - szintaktikus fémhab - kompozit anyagot, előállítási módszerét a **2.1 fejezet**ben mutatjuk be. A próbatest geometriai rekonstrukciójának alapja a mintavételezés. Napjainkban számos felületdigitalizáló eljárás terjedt el, amelyekkel fizikai objektumok képezhető le, előállítva a vizsgált darab virtuális modelljét. Ezek a technológiák jól alkalmazhatók külső topológiák modellezéséhez, azonban a belső szerkezeti struktúráról nem képesek információt közölni. Teljes szerkezeti rekonstrukcióra egyedül a CT röntgen eljárás alkalmas (**2.2 fejezet**).



1.2. ábra: TDK munkánk a kutatási folyamatban

A leképzett felületek modellezése, mint *ReverseEngineering* folyamat évek óta ismert és alkalmazott mérnöki tevékenység. A kereskedelemben kapható szoftverek a modellezési munkában az esetek többségében jól alkalmazhatók, de a mi esetünkben nem alkalmasak a feladat megoldására. A dolgozatunk súlyponti része egy olyan módszer kidolgozása, amely a CT adatok rétegfelvételeiből építi fel a próbatest geometriai modelljét. A rétegfelvételeket digitális képfeldolgozással értékeltük ki, kezdetben hagyományos él detektálási algoritmusokkal. Munkánk során bebizonyosodott, hogy az ismert algoritmusok (**2.3 fejezet**) csak korlátozott mértékben alkalmasak fémhab próbatestünk modellezésére, ezért *HoughCircle* módszert tovább fejlesztettük (**3.1 fejezet**) valamint egy új algoritmust írtunk (**3.2 fejezet**). Az eredményeket egy olyan adatbázisban (**3.1.4 fejezet**) foglaltuk össze, amely a próbatest minden egyes elemi cellájának (gömbhéjának) információját tartalmazza. Az adatbázist elemeiből CAD rendszerben létrehoztuk a próbatest geometriai modelljét (**4. fejezet**).

2. Irodalomkutatás

2.1 Szintaktikus fémhab

A fémhabok a három fő anyagcsalád (fémek, kerámiák és polimerek) kombinációjából előállítható kompozitok anyagcsaládjába tartoznak. A kompozitok mátrixanyagból, erősítőanyagból és a közöttük húzódó átmeneti rétegből épülnek fel. A mátrixanyag találkozik közvetlenül a terheléssel, azt az átmeneti rétegen keresztül továbbítja a tényleges teherviselő erősítőanyagnak. A kompozitokat az alapján csoportosítják a leggyakrabban, hogy milyen formában jelenik meg bennük az erősítőanyag. Eszerint megkülönböztetnek részecske-, vagy szálerősítéses kompozitokat, szendvicsszerkezetű kompozitokat [2].

Egy másik fontos csoportosítási szempont az, hogy a fémhabban jelenlévő cellák egymással kapcsolatban állnak-e, vagy sem. Eszerint megkülönböztetünk nyílt- és zárt cellás fémhabokat. A fémhabok egy speciális csoportját adják a TDK munkánk tárgyát is képző úgynevezett *szintaktikus fémhabok*. Ezekbe a kompozitokba apró, üreges kerámia mikrogömbhéjakat építenek be, ezzel biztosítják a szerkezet porózusságát.

A szintaktikus fémhabok olyan zárt cellás porózus szerkezeti anyagok, amelyekben a porozitást a fémes mátrixanyagba ágyazott, egymáshoz képest többé-kevésbé szabályos és egyenletes elrendeződésű mikrogömbhéjak segítségével bevitt üregek adják. Ezek, a tervszerűen bevitt üregek adják a szintaktikus fémhabok mikrogömbhéjakból adódó porozitását. A mátrixanyag és a gömbhéjak között átmeneti réteg (interfész) jön létre, így a szintaktikus habok a részecskeerősítésű kompozitok definíciójának is megfelelnek [2].



2.1. ábra: Szintaktikus fémhab besorolása [3]

A szintaktikus fémhabok anyagai

A szintaktikus fémhabok mátrixanyaga jellemzően valamilyen könnyűfém, az esetek többségében alumíniumötvözet. Alkalmazásukat főleg a kis sűrűségük indokolja, amely a habanyagok szempontjából döntő jelentőségű. Mellettük szól kis olvadáspontjuk (a gyártás szempontjából fontos) és korrózióállóságuk is.

A szintaktikus fémhabokban olyangömbhéjakat alkalmaznak, amelyek többé-kevésbé hőállóak és kémiaiilag stabilak, mivel a mátrixanyagok olvadtállapotban nagyon reakcióképesek. Ezért (a szakirodalom alapján) szintaktikus fémhabokban nagyobb Al_2O_3 -tartalmú, vagy fém gömbhéjakat használnak. Alkalmazásukat jó mechanikai tulajdonságaik (nyomószilárdságuk) és jó közelítéssel gömb formájuk is indokolja.



2.2. ábra: Szintaktikus fémhab próbatest

A szintaktikus fémhabok előállítása

A szintaktikus habok gömbhéjait alapanyaguktól függően változatos technológiával cseppentéssel, koaxiális fúvással, szol-gél eljárás, elvesző magos eljárás stb.) állítják elő.

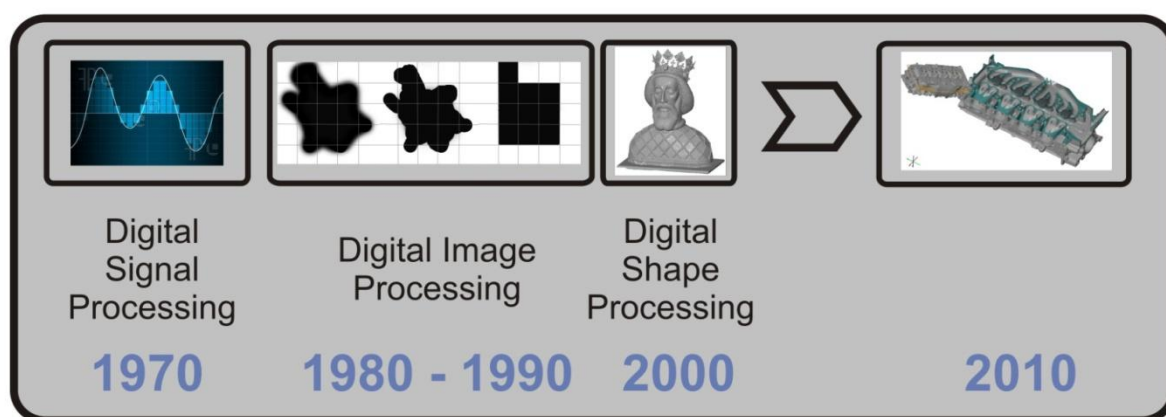
Az előállítási technológia befolyással van a kialakuló fémhab szerkezetére, porozitására és ezeken keresztül csaknem minden tulajdonságára.

A következő felsorolás tartalmazza a leginkább elterjedt módszereket, a főbb gyártókat és a termékek kereskedelmi neveit [4].

1. gázátbuborékoltatás (ALCAN, CYMAT, HYDRO)
2. fémhabok előállítása habképző anyaggal (MEPURA, Fraunhofer Intézet, zárt cellás)
3. ömledékmellurgiai habosító eljárás (ALPORAS, zárt cellás)
4. fémhabok előállítása hő hatására kiolvadó anyaggal (nyílt cellás)
5. fémhabok folyamatos előállítása (zárt cellás)
6. fémhabok előállítása különálló fém gömbhéjakból (zárt cellás) (Fraunhofer Intézet, Németország)
7. fémhabok előállítása kioldódó töltőanyaggal, infiltrációval (kísérleti célra, nyílt cellás, BME-ATT Fémes Kompozit Laboratórium)
8. fémhabok előállítása üreges kerámia töltőanyaggal, nyomásos infiltrálással (zárt cellás, BME-ATT)

2.2 Komputer tomográf (CT)

A digitalizálás szó beépült a mindennapi szókincsünkbe: értjük ez alatt, amikor "beszkennelünk" egy dokumentumot, vagy bakelit lemezt "kiírunk" CD-re. Digitalizálják a hagyományos, filmszalagra vett filmeket is. Minden egyes képkockát *digitális* képpé alakítanak, *digitálisan* retusálják, *digitálisan* újraszínezik, stb. Általánosságban elmondható, hogy digitalizálás nem ,ás, mint analóg adatok (jel, hang, kép stb.) számszerűsítése olyan formába, hogy az számítógéppel feldolgozható legyen.



2.3. ábra: A digitalizálás története

A számítástechnika valamint a képfeldolgozás az ezredfordulóra jutott el olyan szintre, hogy térbeli alakzatok leképezhetővé váljanak. A technológiák mozgatórugója az autóipar volt. Kezdetben a kézzel formázott, 1:4 méretarányú gipsz autó minták virtuális feldolgozása volt a cél, majd egyre nagyobb szerepet kapott a felületdigitalizálási módszerekben a minőségbiztosítási alkalmazások felhasználása. A legyártott termék megfelelőségét a koordináta méréstechnikával ellentétben már nem csak egy - egy jellemző pont eltéréseivel tudta számszerűsíteni, hanem a teljes felületi pontosságról információt adott.

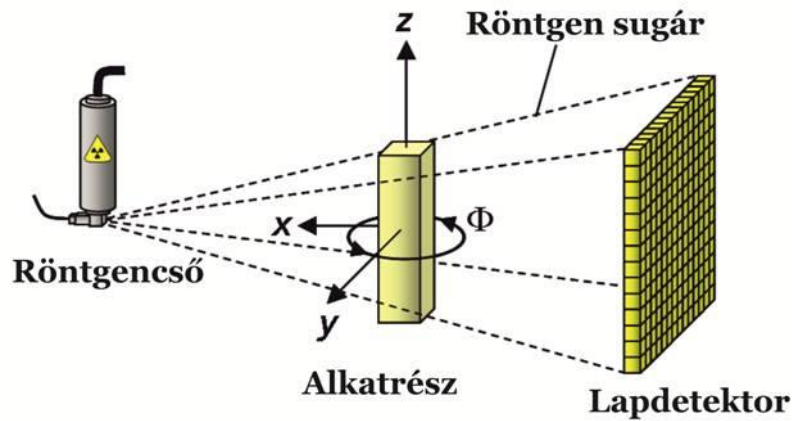
A hagyományos méréstechnikai berendezések (optikai, tapintós mérőeszközök) korlátozottan alkalmazhatóak komplex alkatrészek vizsgálatánál. Az ipari CT berendezés az egyedüli méréstechnikai eszköz, amellyel olyan térfogat-információ szerezhető a vizsgált alkatrészeiről, ami nemcsak a külső burkolófelület topológiáját határozza meg nagy pontossággal, hanem adatot szolgáltat a belső struktúráról, inhomogenitásról is.

A komputertomográf első orvostudományi alkalmazása óta (1972) a módszer számos új technikai fejlesztésen ment keresztül, és egyre nagyobb szerepe lett az alapkutatásokban és különböző anyagvizsgálati módszerekben. A CT technológia a röntgenvizsgálat továbbfejlesztése, amely működésének alapja, hogy egy légritkított üvegcsőbe két elektróda kerül elhelyezésre (anód, katód), melyekre nagyfeszültségű egyenáramot kapcsolnak. Az alacsony nyomású térben a fűtőfeszültség hatására az izzó katódból elektronok lépnek ki, melyek a csőfeszültség hatására felgyorsulnak és nagy sebességgel az anódnak ütköznek. A becsapódó elektronok mozgási energiájának nagy százaléka hővé alakul, a megmaradó részből röntgensugárzás keletkezik.

Rekonstrukciós célokra a sugárzás azon tulajdonságát használhatjuk fel, hogy valamely tárgyon való áthaladás során a sugárzás intenzitása csökken, az anyagra jellemző elnyelési együttható függvényében. A vizsgálat során az I_0 kezdeti intenzitású röntgensugarak egy része az ellenőrzendő alkatrész d anyagvastagságán áthaladva I_1 intenzitásúra, míg azok a sugarak, amelyek az x vastagsági mérettel jellemezhető hibás részen haladnak át I_2 intenzitásúra csökkennek.

A hagyományos röntgenfelvételnél több probléma is nehezíti a kép értékelését; a nagyobb méretű, nagyobb denzitású objektumok eltakarják a kisebbeket, a különböző mélységben elhelyezkedő objektumok különböző méretben jelennek meg a detektoron. Az ipari CT ezeket a hibákat több irányból készített vetületekkel semlegesíti - készít egy 2D-s röntgenfelvételt az vizsgálandó objektumról, majd a tárgyasztal és az azon felfekvő alkatrész egy kis szöggel elfordul. Ez addig ismétlődik, amíg az alkatrész teljesen körbe nem fordul és ez idő alatt minden egyes kis szögelforduláshoz egy röntgenkép készül. A munkadarab ellentétes oldalán

elhelyezett detektor érzékeli a különböző intenzitást. A detektor összegyűjti a testen áthaladó röntgensugarakat, és látható fénné konvertálja azokat. A fényt fotódiódák konvertálják elektromos jellé, és a detektor elektronikája ezeket a szinte alig mérhető elektromos jeleket alakítja át digitális jelekké [5].

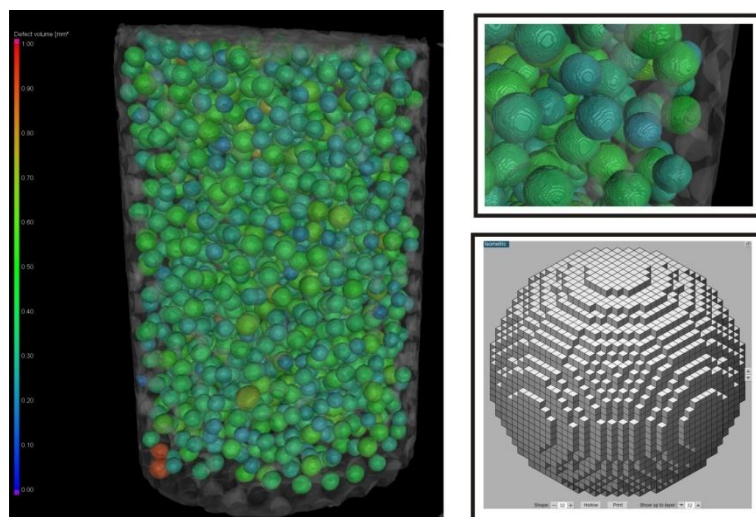


2.4. ábra: A CT elvi működése

Ezek a digitális jelek nagysebességű optikai kábelén keresztül kerülnek a rendszer képfeldolgozó processzorába, amely jelentős számítóteljesítményével valós időben hoz létre nagyfelbontású rekonstrukciós képet. A használat szempontjából alapvető fontosságú a megfelelő detektorfelbontás. Minél magasabb a detektor, és így a CT-berendezés felbontása, annál jobban lehet a képeken vizsgált tárgy részleteit felismerni. A detektor csatornáinak és vonalainak számából kiszámítható pixelszám a detektorok egyik legfontosabb tulajdonsága[6].

A fémhab próbatest CT szkennelését μF (mikro fókusz) röntgen csővel és sík panel detektálással végeztük. A vizsgálati paramétereket indokolta, hogy:

- a μF röntgen csővel nagy felbontás érhető el (a felbontást a fókuszpont mérete jelentősen befolyásolja),
- a sík panel használatával egy CTszkennelés elegendő a térbeli adatok leképzéséhez.



2.5. ábra: A fémhab próbatest CT rekonstrukciója

További szkennelési paraméterek, ill. elért felbontás:

Csőfeszültség:	170 kV
Csőáram:	2,00 mA
Projekciós szám:	1280
Detektálás:	Flat panel
Felbontás:	0,024 mm

2.3 Képfeldolgozó, kördetektáló algoritmusok

Hough transzformáció

A Hough transzformáció előre definiált, néhány paraméterrel leírható alakzatok keresésére alkalmas. Az alapváltozata egyeneseket képes felismerni. A bemenete általában egy élkimemelt változata az elemzendő képnek. Egy ún. akkumulátor térbe transzformálja a képet, melyben a legintenzívebb pontok maguk a keresett objektumok. A leképezés számítása a következőkön alapul.

A keresendő alakzatot paraméterekkel kell leírni, például egy egyenest ($y = mx + b$) a meredekségével és az eltolásával. A paraméterterben így minden képpont egy lehetséges keresett alakzatnak felel meg. A bemenő kép pixeleit tekinti, és minden ponthoz kiszámítja azon paramétereket, melyek konzisztensek a kiinduló ponttal. Ez egy alakzatot – a példa egyenes esetén $m = f(b)$ görbe – eredményez a paraméterterben. Miután minden pixelt egy paraméterterbeli alakzatra képezett le, meg kell keresni azon keletkezett csomópontokat, ahol

számos görbe áthalad. n darab áthaladó alakzat azt jelenti, hogy a csomópont által meghatározott paraméterekkel rendelkező keresett objektummal pontosan n darab pixelérték konzisztens az eredeti képen. A paramétertér az implementáció során akkumulátor térré módosul, mely listaszerűen tartalmazza a lehetséges paraméter értékeket kvantálva, és számlálja, hogy hány pixel konzisztens az adott paraméterekkel. Erre a lépésre azért van szükség, mert a paramétertér folytonos és nem is mindig korlátos.

A Hough transzformációnak számos javító módosítása ismert. Létezik gradiens vektorokat felhasználó változata. Egy egyenes keresése esetén például csak azok az egyenesek jöhetnek szóba a paramétertérben, melyek merőlegesek az adott pontbeli gradiens vektorra, így jelentősen csökkenthető az akkumulátor mérete. Létezik egy ún. kernel alapú változat is, amely pixelcsoportokon dolgozik, és elmosott alakzatokra képez a paraméter térben. Ezzel a megoldással gyorsítani lehet a futást és csökkenthető a zajérzékenység.

A Hough transzformáció kibővíthető tetszőleges, paraméterekkel leírható alakzatokra – például ellipszisre –, akár a háromdimenziós térben is, de a tapasztalatok szerint a 3-4 paraméternél többel leírható alakzatokra már nem hatékony a paramétertér robbanása miatt. További problémája, hogy érzékeny a zajos bemeneti képre, és inkább csak kisebb felbontások mellett alkalmazható.

Az általánosított Hough transzformáció bármilyen alakzat keresésére alkalmazható, nem kell, hogy paraméterekkel leírható legyen. A keresendő alakzat modellje képként adott, az algoritmus pedig a vizsgált pixelekkal konzisztens transzformációkat keres.

Általános körök esetén az (a,b,r) Hough-tér 3-dimenziós lesz:

$$ax^2+by^2=r^2 \rightarrow f(x,y,a,b,r)=ax^2+by^2-r^2=0$$

Amennyiben pl. adott (konstans) r -sugarú kört keresünk, akkor a paraméter-tér 2-dimenziósra csökken – a gyakorlatban ez használatos.

A 2-dimenziós Hough-térben minden élpontnak egy, a potenciális középpontokat tartalmazó kör felel meg.

Threshold algoritmus

A threshold (küszöbszint), az a szint, amit ha a bemenetre érkező jel meghalad, akkor az algoritmus beavatkozik.

Többféle beavatkozás lehetséges. Bináris beavatkozás esetén a küszöbszintnél magasabb fényintenzitású pixelek a maximum(255) értéket veszi fel, minden más esetben pedig a 0 értéket.

Kizáró threshold esetén a küszöbszintnél magasabb értékű pixelek a küszöbszint értékét veszik fel. minden más esetben a pixelek értékei változatlanok maradnak

Küszöbszint nullára esetén, a küszöbszintnél magasabb értékű pixelek változatlanok maradnak. Minden más esetben a pixel a 0 értéket veszi fel.

- **THRESH_BINARY**

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} \text{maxval} & \text{if } \text{src}(x, y) > \text{thresh} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- **THRESH_BINARY_INV**

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } \text{src}(x, y) > \text{thresh} \\ \text{maxval} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- **THRESH_TRUNC**

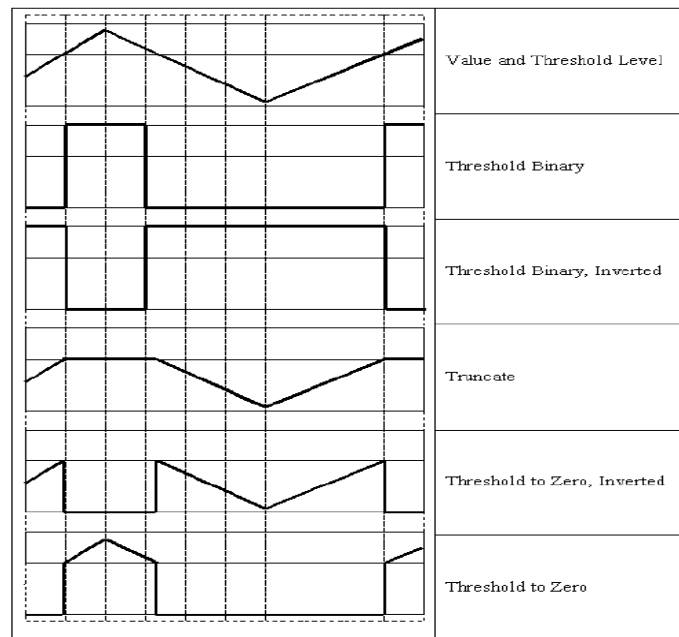
$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} \text{threshold} & \text{if } \text{src}(x, y) > \text{thresh} \\ \text{src}(x, y) & \text{otherwise} \end{cases}$$

- **THRESH_TOZERO**

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} \text{src}(x, y) & \text{if } \text{src}(x, y) > \text{thresh} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- **THRESH_TOZERO_INV**

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } \text{src}(x, y) > \text{thresh} \\ \text{src}(x, y) & \text{otherwise} \end{cases}$$



2.6 ábra: Treshold típusok [8]

Canny féle éldetektálás

A Canny algoritmus az egyik legrégebbi, a leggyakrabban alkalmazott és a mai napig az egyik leghatékonyabb éldetektor. A hátere matematikailag jól megalapozott, elméletben optimális eredményt ad. A valóságban az eredménye pontos, kevés élet vét el, és kevés hamis találatot ad. Egy valódi él csak egy választ ad, ami nem mindig teljesül más éldetektoroknál. A matematikailag optimális változatát ritkán használják, ehelyett egy egyszerűbb közelítést alkalmaznak, mely a következő lépésekből áll: az algoritmus kezdetben egy Gauss simítást hajt végre a képen, majd közelíti az iránymenti deriváltakat. Utóbbi történhet például egy Sobel operátorral. A következő lépésben az iránymenti deriváltakból kiszámítja a gradiensvektor nagyságát. Az így kialakult kép nagy intenzitású nyergein lesz az él. Ehhez először a nyergeket választja ki: csak azon pontokat tartja meg, melyeknél a gradiensre merőleges irányokban a szomszédok mindegyike kisebb intenzitású a vizsgált pontnál, a többi pontot pedig eldobja. A megmaradt pontokat hiszterézises küszöbözéssel válogatja meg, melyhez két, a konkrét feladathoz illeszkedő küszöb szükséges. Egy tetszőleges a magasabbik küszöbnél nagyobb intenzitású pontból indul ki, majd végigköveti az élet az alacsonyabbik küszöböt használva. Ha véget ér az él, akkor újrakezdi a követést egy másik pontból, amíg van a nagyobb küszöbnél magasabb intenzitású pont. Ilyen módon megszabadul a néhány pixeles zajoktól, de a szakaszonként elhalványuló éleket végig tudja követni. Az így kialakult bináris kép fogja tartalmazni a minden esetben 1 pixel széles éleket [8].

Sobel operátor

A Sobel operátor egyszerű, de hatékony gradiens közelítést tesz lehetővé. Az iránymenti deriváltakat közelíti véges differenciával, melyekből a gradiens vektor normája és szöge számítható. Az iránymenti deriváltak számítási algoritmusai irányonként egy 3x3-as mátrixszal való konvolúcióból áll. A végeredmény ekvivalens egy közelítő Gauss simítás utáni véges differencia számítással. A konvolúciók szeparálhatók két darab három hosszú vektorral való konvolúcióra, melynek köszönhetően az algoritmus igen gyors lesz. A módszer hátránya, hogy nem invariáns a forgatásra [9].

A konvolúcióhoz használt mátrix a függőleges irányú derivált közelítéséhez:

-1 -2 -1
0 0 0
1 2 1,

illetve a vízszintes irányú derivált közelítéséhez:

-1 0 1
-2 0 2
-1 0 1.

Gauss élsimítás

Egy Gauss elmosás (más néven Gauss simítás) eredménye egy kép elmosódása egy Gauss-függvény segítségével. Ez egy széles körben használt grafikai algoritmus, általában csökkenti a képzajt és csökkenti a részletességet. Egy a konvolúcióhoz használható mátrix:

Gauss elmosás (Gaussian blur)

1	2	1
2	4	2
1	2	1

* 1 / 16

InRange

Thresholdhoz hasonló algoritmus, mely ugyanúgy egy küszöbérték alapján módosítja a pixelt a minimum és maximum irányba. Két határt kell definiálni az algoritmusnak. Ezek a határok egy alsó és egy felső színtöréskorlát. Az ezen az intervallumon belül eső pixelek a maximum, minden más a minimális értéket veszi fel [10].

OpenCV

Open Source Computer Vision egy nyílt forráskódú, a számítógépes látást és a gépi tanulást segítő szoftver könyvtár. BSD licenc által szabadon felhasználható mind tudományos, és kereskedelmi termékek fejlesztésében.

2. 4. Problémafelvetés

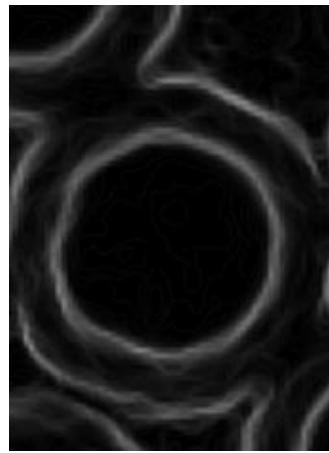
A kerámia gömbhéjakkal erősített alumíniumhabok (kompozit habok) CT rétegfelvételein található körszerű objektumok detektálása speciális képfeldolgozási eljárást igényel. Ennek egyik oka, hogy az objektumok alakja nem szabályos, számos egymásba metsződő gömbhéj található, így a legtöbb matematikai elméleten alapuló algoritmus hibákat eredményez. Az élkeresés elvén működő algoritmusok érzékenyek az objektumok szabálytalanságaira, így helytelenül detektálják azokat.

2.4.1 Miért nem alkalmazhatók a meglévő szoftverek és algoritmusok erre a speciális feladatra?

A teszteléseink során olyan meglévő körfeldolgozó algoritmusokat alkalmaztunk, mint például a HoughCircle algoritmus. A HoughCircle találati eredményei nem eredményeztek tökéletesen illeszkedő köröket. Abban az esetben sem, ha a képet a jobb élkeresés céljából transzformáltuk (Threshold, CannyEdge, Sobel stb.). A kompozit hab sajátosságai közé tartozik, hogy nem szabályos köröket tartalmaz (2.7.ábra), ezért a változó körívek miatt több kört is detektál egyetlen körszerű objektumhoz. Az élkeresővel transzformált képen jól látható, hogy a keresendő kör íve nem szabályos (2.7.b. ábra).



a: Eredeti kép



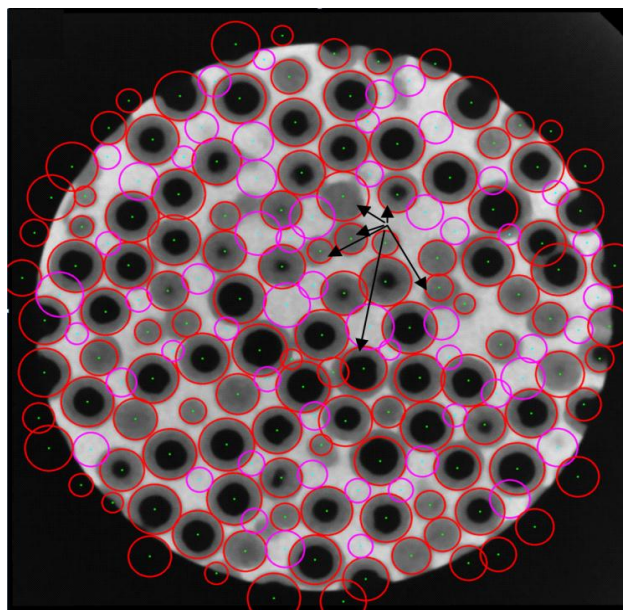
b: Élkeresővel transzformált kép

2.7. ábra: Gömbhéjak a CT rétegfelvételen

Előfordul olyan eset, amikor a sűrűn elhelyezkedő körök által közbezárt területeknél talál olyan ívet, amit körnek detektál (2.8.ábra, lila körök).

Az említett ívproblémák miatt, több lehetséges kört is észlel a HoughCircle algoritmus, mint amennyire szükségünk lenne (2.8.ábra, lila körök).

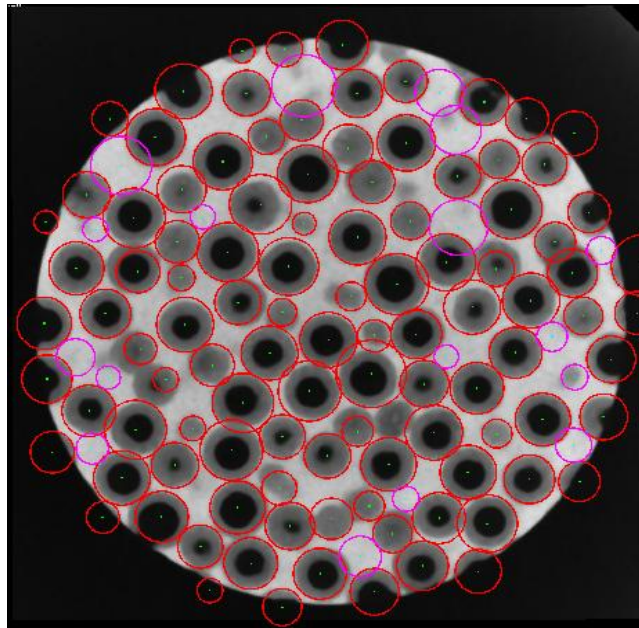
További gyakori hiba, hogy egy körszerű alakzatnak csak egy szabályos részletéhez illeszt kört, és figyelmen kívül hagyja az ív folytatását, a detektált kör következképpen hibás (2.8. ábra, nyíllal jelölt körök).



2.8. ábra: Rosszul detektált körök eredmény képe

Az élek jobb detektálása érdekében különböző élkereső transzformációkkal (Treshold, CannyEdge, Sobel stb.) és olyan szűrési feltételekkel, mint például a középpontoktól sugárban megadott távolság megadásának segítségével csökkenteni lehet a rosszul detektált körök számát (2.8. ábra).

Ez a megoldás azonban még mindig nem produkál elfogadható eredményt.



2.9. ábra: Szűrt eredmény képe

A szűrt eredmény képén jól látható, hogy maradtak helytelenül detektált, illetve a szükségesnél kisebb vagy nagyobb körök is (2.9. ábra).

2.4.2. Következtetés: Miért van szükség, saját algoritmusra vagy az eddigiek kiegészítésére?

A tesztfuttatások után arra következtettünk, hogy az alumínium-kerámia kompozit habok speciális esetében a szakirodalomban található algoritmusok kiegészítésre szorulnak, vagy saját algoritmusokkal jobb eredményeket tudunk elérni. A fent említett problémák miatt az ismert algoritmusokat csak kiegészítésként alkalmazzuk.

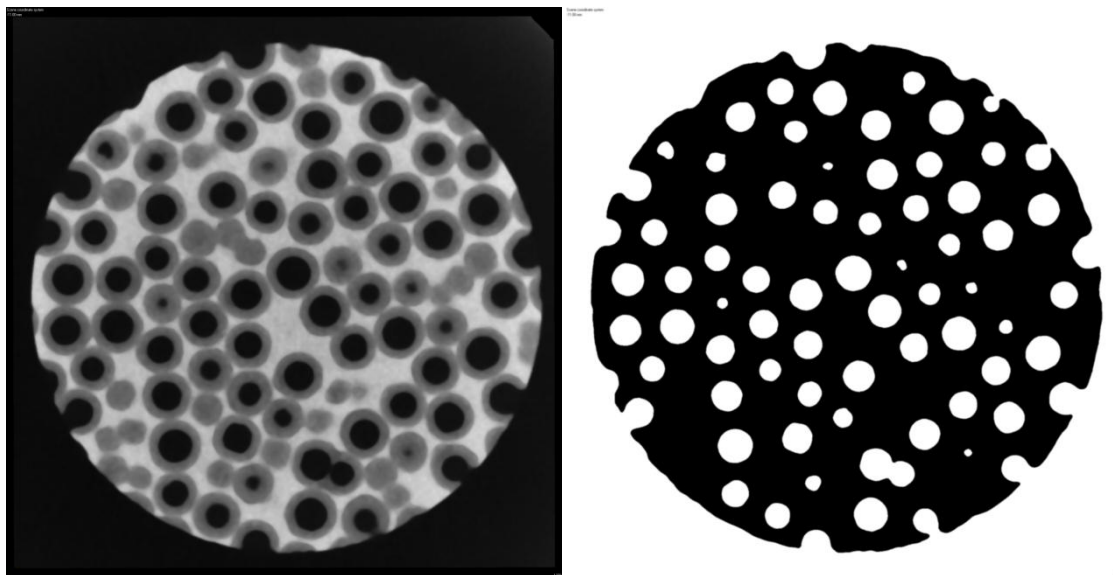
3.1. Meglévő algoritmus kiegészítéseivel tervezett módszer

Mindenekelőtt megpróbáltuk kihozni a HoughCircle algoritmus önálló használatából a lehető legjobb körívfelismerési műveleteket.

A CT felvételek kiértékelése Hough transzformáció segítségével, feladat specifikus eljárások bevezetését vonta maga után, mind a szeletek egyenkénti kiértékelése, mind a teljes analízis szempontjából. A szeletek fő problémái a voxelek pixelekké alakítása során keletkező elmosódás az összeérő alakzatokból adódó szegmentálás szükségessége és, hogy az alakzatok csak körszerűek, nem pedig körök. A teljes analízis szempontjából gömbök detektálása a célunk, ehhez azonosítani kell a gömbökhöz tartozó köröket a szeleteken. Utóbbi probléma magában hordozza annak megoldását is.

3.1.1. Szeletek

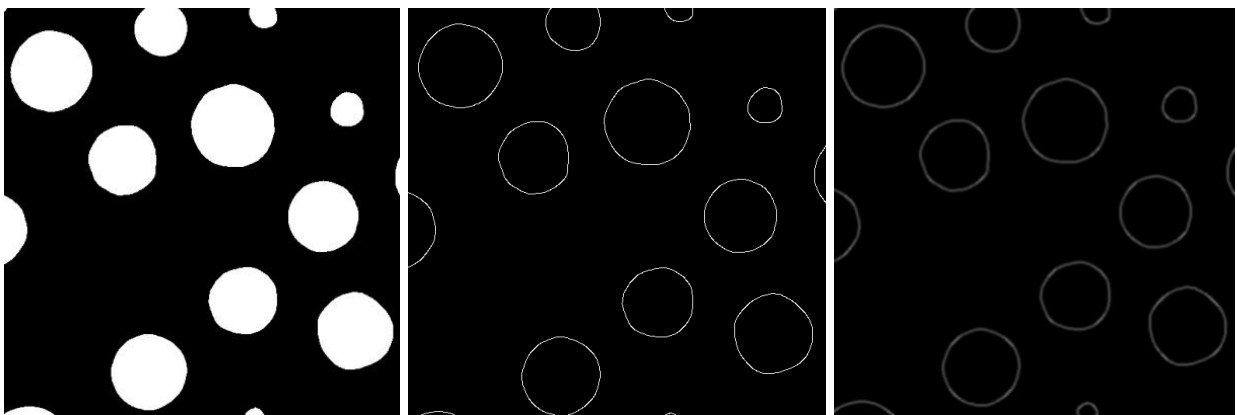
Az elmosódások CT-képek készítésekor a voxelek jelegéből adódnak. Az elmosódásokat képfeldolgozási módszerekkel könnyedén javíthatjuk. Első lépésben threshold algoritmus segítségével kiemelhetjük a számunkra fontos információt tartalmazó részeit a képnek és elkülöníthetjük a lényegtelen és zavaró objektumokat (3.1.1. ábra). Az így kapott képen a sötét körök egységes, homogén színt kapnak, akárcsak a világos fém részei is.



3.1.1. ábra: Az eredeti kép és a threshold algoritmus alkalmazása utáni

Második lépésként a threshold-dal szegmentált képeken meg kell keresnünk a határvonalakat. Erre a rendelkezésre álló él-kereső algoritmusok közül a Canny (lásd: fejezetcím) félélt találtam a legjobbnak. Az így kapott képen, fekete alapon fehér színnel egy pixel vastagon kirajzolódnak a szegmentált alakzatok körvonalai.

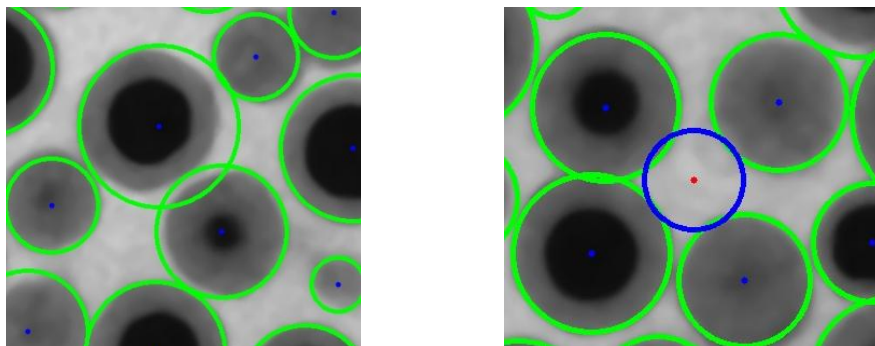
Ezzel még nem fejeződtek be az átalakítások, mivel az egy pixel vastag vonalak nem elég simák, nagyon erősek a szögek az ívelt vonalakon, illetve előfordulhatnak felesleges élek is, ami hibás keresést eredményez. Utolsó lépésként tehát el kell simítani az éleket, méghozzá a lehető legkisebb mértékben, hogy az adat ne sérüljön az eljárás folyamán. Ehhez Gauss-féle élsimítást alkalmaztunk 3*3-as mátrix konvolúcióval (3.1.2 ábra).



3.1.2. ábra: Threshold algoritmus utáni kép, Canny algoritmus utáni kép, élsimított kép

3.1.2. HoughCircle – Problémák és megoldások

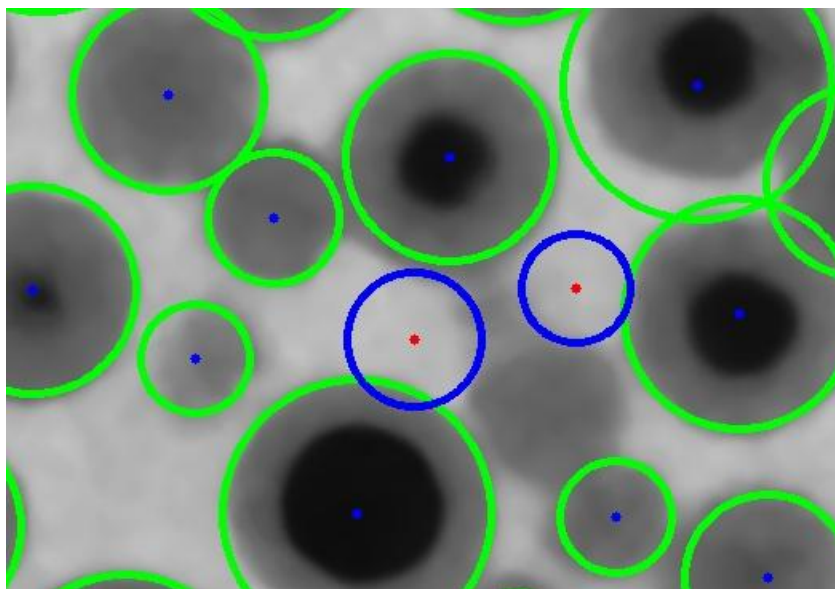
A CT rétegfelvételek (szeletek) az előzőekben ismertetett módosítások után alkalmassá válnak, hogy köröket keressünk rajtuk. A Hough transzformációból képzett körkereső algoritmus (lásd: fejezetcím) megfelelő beállításokkal megközelítőleg jó eredményeket hoz, viszont bizonyos esetekben nincs egészen jó helyen a kör középpontja, ami hibás rádiuszt is okoz. Másik hiba, amikor az analízis olyan kört talál, amelyet nem mi nem szeretnénk vizsgálni (3.1.3. ábra).



3.1.3. ábra: Rosszul detektált középpont, fals kör

Az első probléma oka, hogy a felvételeken szereplő alakzatok csak körszerűek, így az algoritmus az egész alakzat egy olyan ívéhez igazítja a kört, amelyet először megtalál. Hangsúlyos, hogy amit először talál, mivel ha talál egyet, ahhoz bizonyos távolságban nem keres újat. Ez egy olyan beállítás, amelyet a körkereső algoritmus paraméterként kap, és azért van rá szükség, mert ellenkező esetben rengeteg kört képes illeszteni egyetlen alakzathoz.

A szükségtelenül detektált körök előfordulását az előző bekezdésben említett eljárás nem tudja megszüntetni, mivel egészen más okból jönnek létre. Ezek valójában tényleg körök, melyek valójában a képen vannak, csak az emberi szem hajlamos elsiklani felettük, mivel ezek úgy jönnek létre, hogy a körök közötti területen rajzolódik ki, vagy egyszerűen olyan pozíciót vesznek fel egymáshoz képest, ami egy új, nagyobb kört alkot.



3.1.3. ábra: Rosszul detektált körök azonosítása

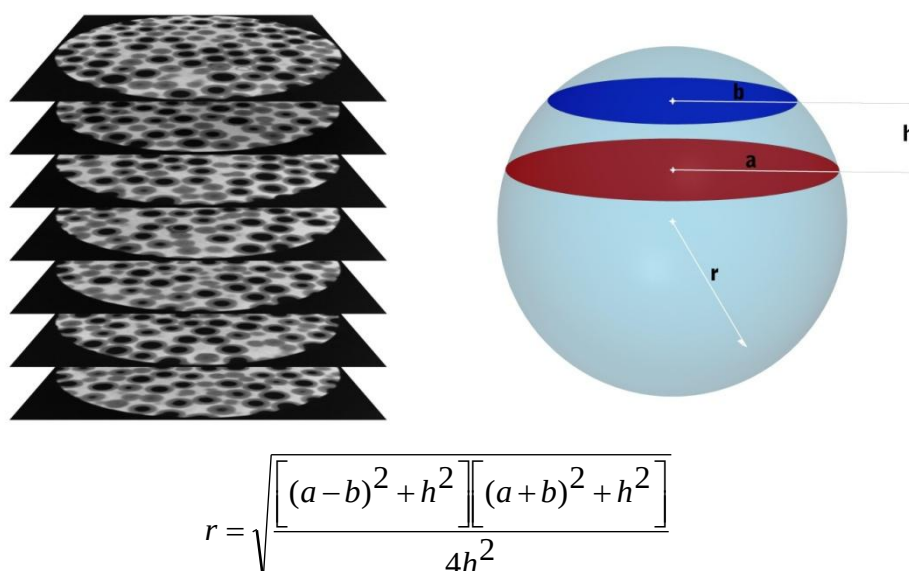
Szerencsére ezeknek a közös tulajdonságoknak köszönhetően szűrhetők is lesznek, ha a kerámiagömbök sajátosságait ismerjük: A nagyobb körök egyszerűen a méretüknél fogva, kiugró értéként azonosíthatók. A kisebbek pedig minden esetben nagyobb részt világos pixelekből álló régiókat jelölnek ki az eredeti képen, és emiatt könnyű elkülöníteni őket.

A módosítások után már, csak a vizsgálat célját meghatározó alakzatokhoz tartozó köröket kapjuk meg minden CT felvételen.

3.1.3. Analízis

A metszetek egyenkénti kiértékelése után az együttes vizsgálatukból meghatározzuk a fém mátrixban lévő kerámia gömbök elhelyezkedését és méretét.

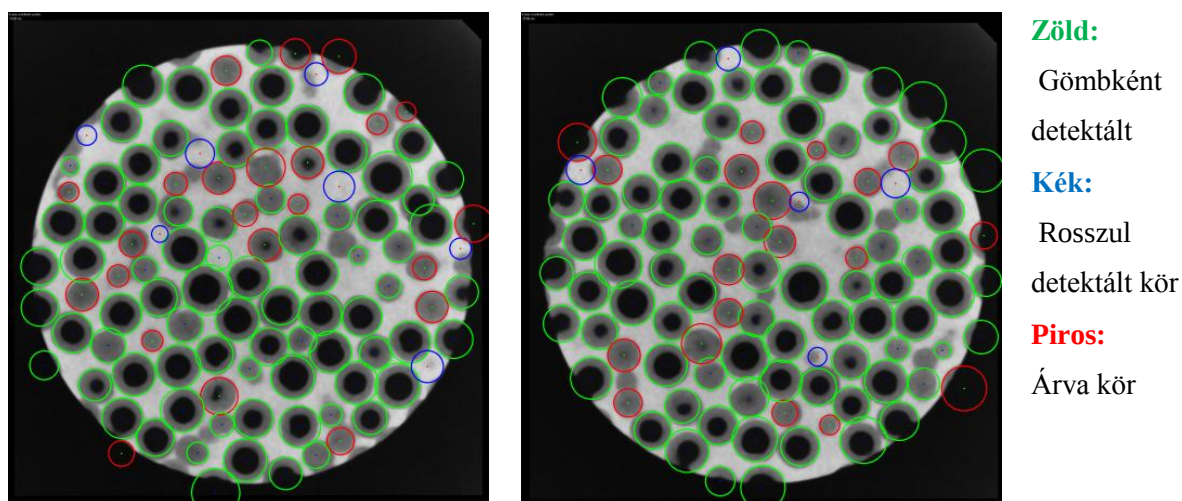
A gömbök azonosítása az egymás mellett lévő szeletek kiértékelésével történik. Megvizsgáljuk az egyes szeleteket úgy, hogy a szomszédos szeleteken talált köröket összehasonlítjuk. Ha egy bizonyos intervallumon belül egy szomszédos szeleten is megtalálható egy kör, akkor azokat egy kerámia gömb részének tekinthetjük. Miután ezt megismételjük minden szeleten, a legtöbb, az előzőekben már detektált kör valamelyik detektált gömb részét képezi. Mivel minden gömbről legalább két szeletünk áll rendelkezésre, kiszámítható a gömb középpontja és rádiusza is. (3.1.4. ábra)



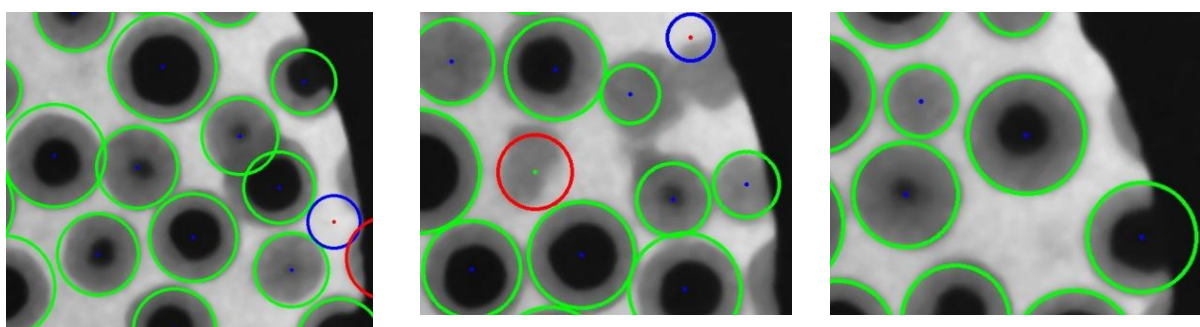
3.1.4. ábra: A gömb adatainak meghatározása két metszetből

Az analízis során megmaradnak olyan körök a metszeteken, melyek egy gömbhöz sem lettek hozzárendelve. Ezek az ún. „árva körök” a legnagyobb számban az első és az utolsó szeleten találhatók (3.1.5. ábra). Ennek egyértelmű oka az, hogy nekik csak az egyik oldalról van szomszédos szeletük, így olyan esetben mikor egy gömb az első szeleten még szerepel, de a másodikon már nem, – mivel valahol a kettő között van a gömb legalsó pontja – akkor az árva kör jelenléte nem jelenhet hibát. A probléma akkor van ha egy árva kör nem egy szélső szeleten jelentkezik (3.1.6. ábra). Ennek több oka is lehet. Az első, hogy olyan apró a gömb hogy csak egyetlen szeleten volt egyértelműen detektálható. Lehetséges még az is, hogy a fent

említett a metszetek méréséből adódó középponti hiba oly mértékű, hogy az a teljes analízisben használt intervallumon kívül esik.



3.1.5. ábra: Első szelet, utolsó szelet



3.1.6. ábra: Megelőző metszet, árva kör egy közbenső metszeten, következő metszet

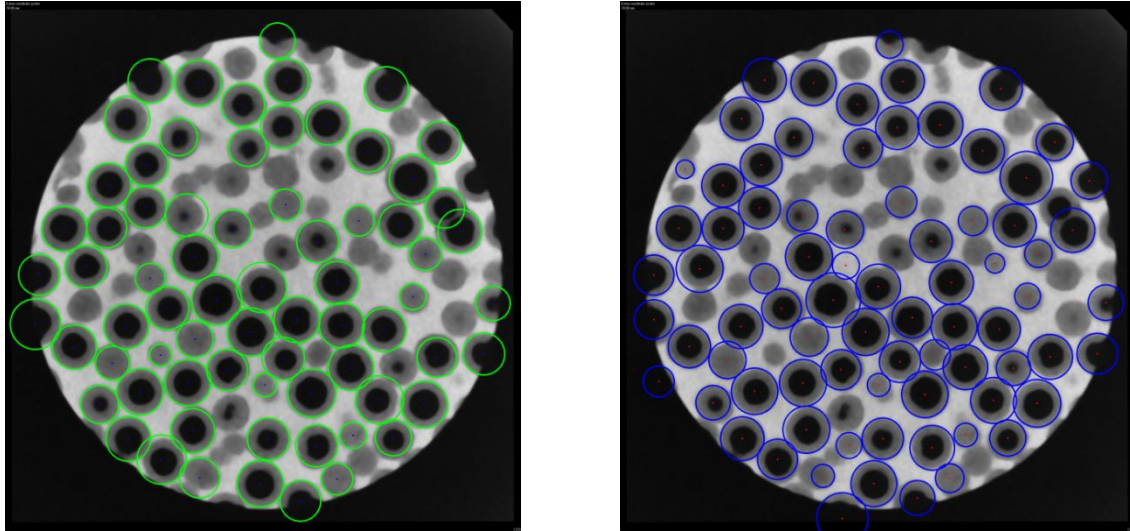
3.1.4 Adatbázis

Az analízisből származó minden adat egy adatbázisba van tárolva. A felépítését tekintve úgy tárolja az adatot, hogy képes legyen egy teljes analízis adatait teljes mértékben elkülöníteni. Az adatbázis legkisebb tárolt adata a kör. Ezek metszetekhez és gömbökhöz vannak rendelve, azok pedig analízishez. Kezdetben minden kör adatait rögzítjük, a fals és az árva körökét is. Később csak azoknak a köröknek adunk azonosítót, amelyek egyértelműen gömbmetszetként értelmezhetőek a szomszédos metszetek kiértékelése során.

3.1.5 Analízisek összehasonlítása – legnagyobb és legkisebb detektálható körök

Az adatbázisnak köszönhetően, ugyanazon CT felvételeket más-más beállításokkal futtatva is analizáltuk, az eredményeket összehasonlítottuk. Az összehasonlításban az első vizsgált analízisnek a módszer legjobb eredményt hozó analízisét választottuk (szemrevételezéssel értékelve). Másodiknak pedig egy olyant, ami ugyanazokkal a beállításokkal fut egyet kivéve.

Ez a paraméter két detektált középpont közötti minimális távolságot határozza meg. A második analízisben ez a lehető legkisebbre, azaz egyre van állítva. Az így keletkezett analízisben minden körszerű objektumhoz több hozzá illeszkedő kör tartozik.



3.1.8. ábra: Első analízis eredmény, átlagolásból származó eredmény

Ha rendelkezünk két ilyen adathalmazzal, könnyedén megkereshetjük az egy objektumhoz tartozó legnagyobb és legkisebb köröket. Ezek segítségével korrigálhatjuk az első analízis értékeit, attól függően, hogy mire van szükségünk. A legkisebb detektálható kör az objektumon belül, a legnagyobb az objektum körül helyezkedik el. Kettejük átlagából számított középpont és sugár bizonyos mértékig alkalmas a módszer hibáinak kijavítására (3.1.8. ábra).

3.1.6 A módszerből levonható következtetések

A módszer a feladat jellege miatt, a várakozásokkal ellentétben, nem hozott egyértelműen elfogadható eredményeket. A legnagyobb problémát az egymást metsző körök jelentik (3.1.9. ábra). Ezeknél az eseteknél egyik javító módszer sem változtatott. A gömbhéjak metszetén a belső körök keresésekor a HoughCircle körkeresés jó eredményt ad. Ennek oka a levegő és kerámia közötti erős kontraszt, így a belső körök detektálása jó alapja lehet egy másik módszernek.

A további módszereknél (3.2-3.3 fejezetek) ezért abból indultunk ki, hogy a belső körök a HoughCircle algoritmussal meghatározva már ismertek, és csak a külső körök keresésére fejlesztettünk saját algoritmusokat.

3.2 Saját algoritmus: tartományok körszerűségének módszere

Program célja:

A program működésének célja a CT rétegfelvételeken található körök detektálása, valamint középpontjuk x,y koordinátájának és sugarának megállapítása.

Program elvi működése:

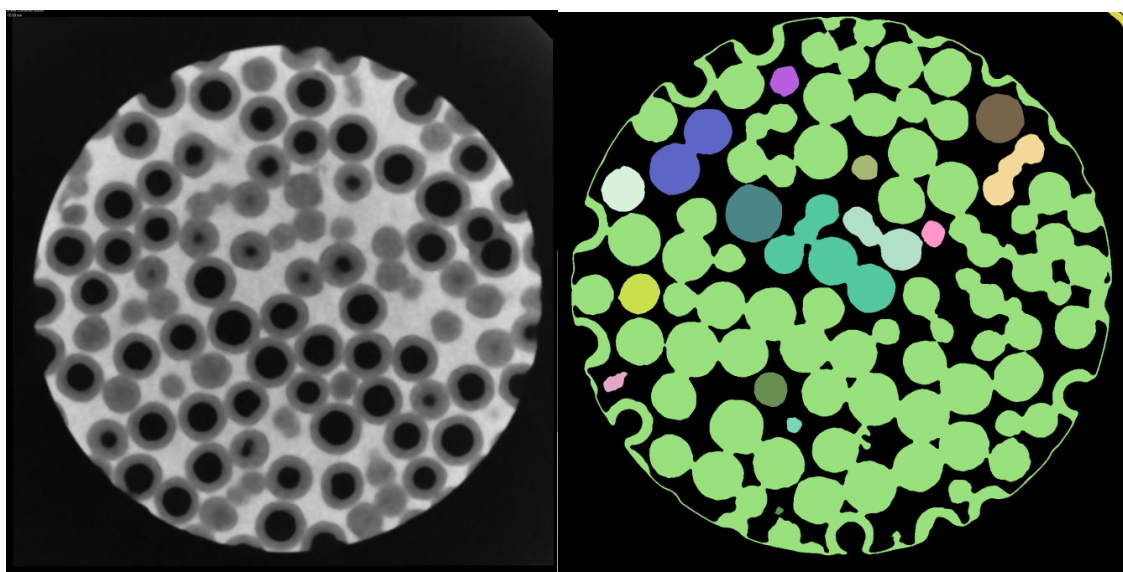
- Egy képen lehetnek belső összefüggések, melyek kihasználásával csoportosíthatóak a képek egyes részei, valamint objektumok detektálása végezhető el. Ilyenek például a képen található pixel értékei (r,g,b kód), amelyek alapján meghatározható az objektum detektálásának egyik fő szűrési feltétele.

Például, ha egy képen több azonos színű objektum van, akkor hatékonyan detektálható az objektum területe az objektum színének r,g,b kódjának megadásával.

Erre a feladatra alkalmasak az úgynevezett Flood-Fill, területegyesítő algoritmusok [6]. A terület egyesítés, a már említett pixel értékek R,G,B kódja szerint történik.

A külső körök detektálásának lépései:

A CT kép sajátosságai közé tartozik az, hogy a keresendő körszerű kerámia területek szomszédosak egymással, így ha az R,G,B kód alapján, a kerámia golyók egybefüggő területeit keressük, akkor eredményül hatalmas területeket kapunk (3.2.1.ábra).



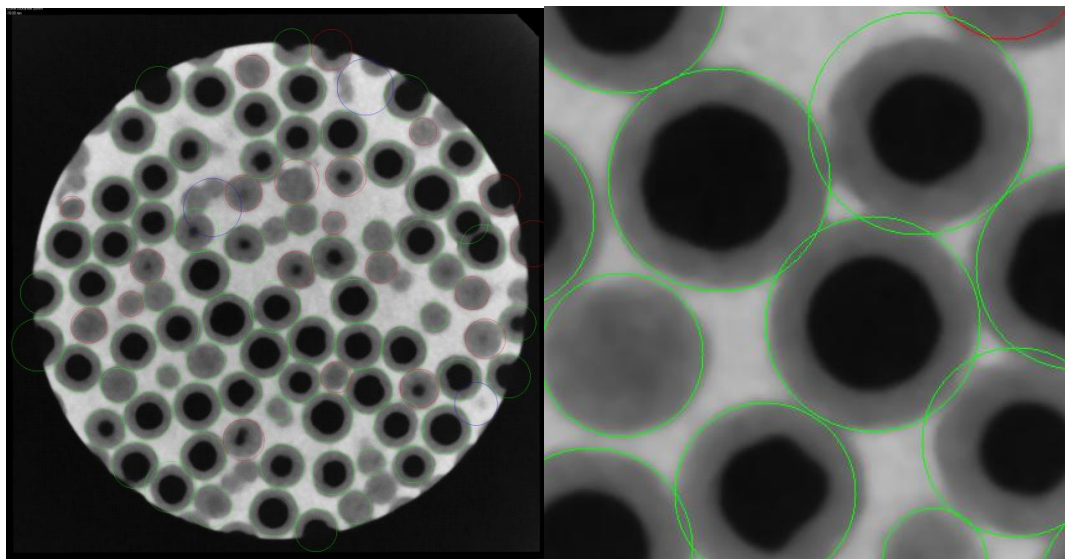
Eredeti CT kép

Detektált egybefüggő területek képe

3.2.1.ábra: Egybefüggő területek detektálása

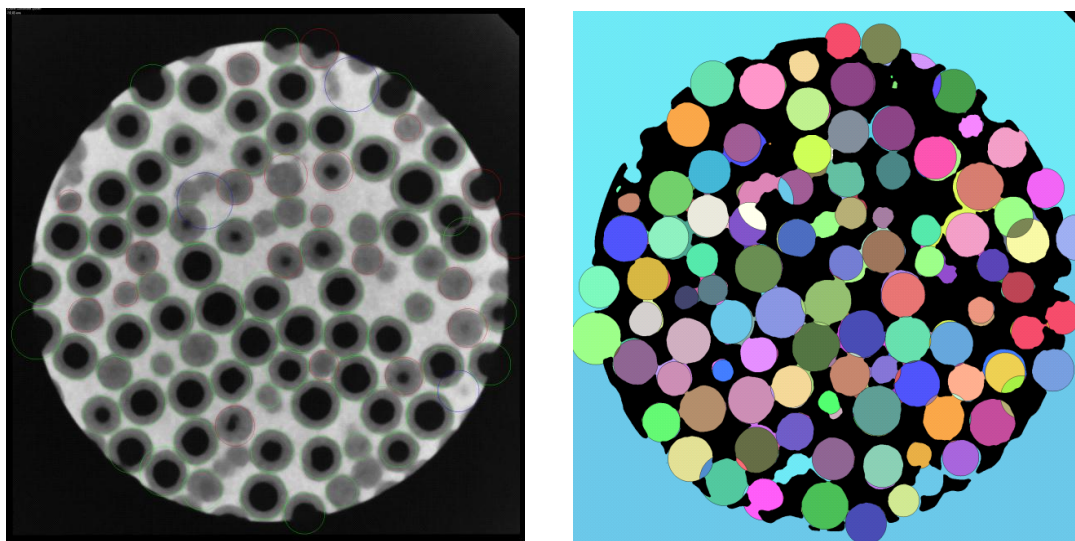
A problémából adódóan feltétlenül szükségünk van a keresendő, szomszédos területek szegmentálására. Erre a célra a HoughCircle körkereső algoritmust használtuk, amely segítségével megfelelően körszerű területekre szegmentáljuk a keresendő szomszédos területeket.

A HoughCircle által megfelelően szegmentált képen az egybefüggő területek megtalálásához a legjobb kördetektálást adó szűrési beállításokból indultunk ki. Az így detektált köröket **közelítő köröknek** tekintjük a szegmentálás kiindulásánál (3.2.2. ábra).



3.2.2.ábra: 1 pixel vastag körívű közelítő körök

A közelítő körök keresésére az $R=G=B<130$ szűrési feltételt adtuk meg, amely a kerámia körök szélein lévő pixelek színekódja.

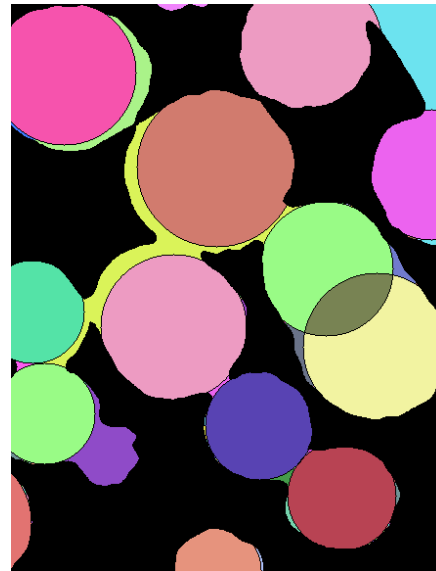
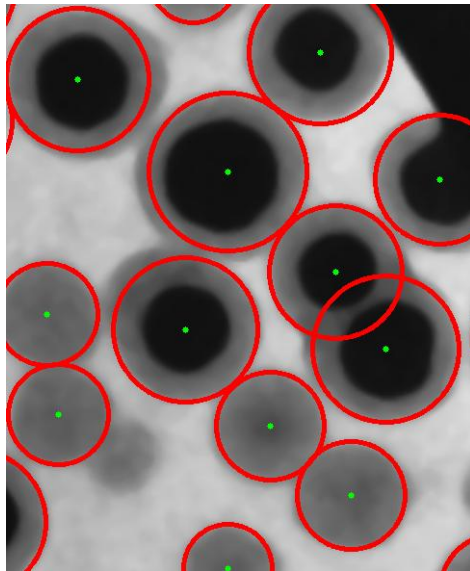


Közelítő körvonallal szegmentált kép

Egybefüggő területek keresése

3.2.3.ábra: A közelítő körök elkülönített területei

A közelítő körök segítségével meghatározott egybefüggő területek keresési eredményén jól látható, hogy olyan területeket is egybefüggőnek érzékelt, amelyek a köríven kívül maradt kerámia területek. Ilyen például a sárga színű, héjszerű nyúlvány területe vagy a két körvonal által 3. területet létrehozott „metszet” területe (3.2.4. ábra).



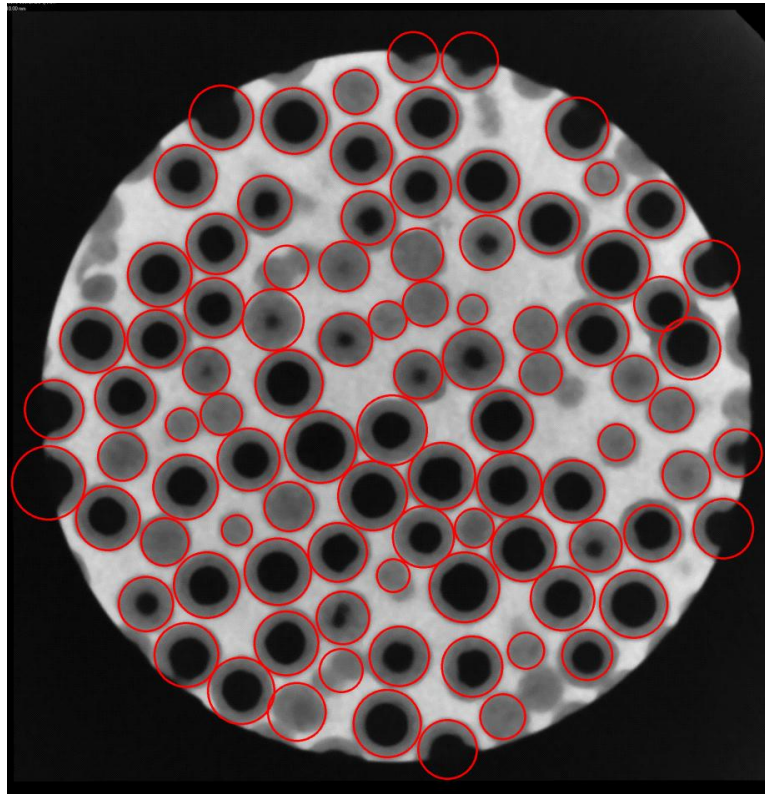
Közelítő

körvonallal szegmentált kép Egybefüggő területek keresése

3.2.4.ábra: Körszerű területek és egyéb metszetek, nyúlványok elkülönítve detektált területei

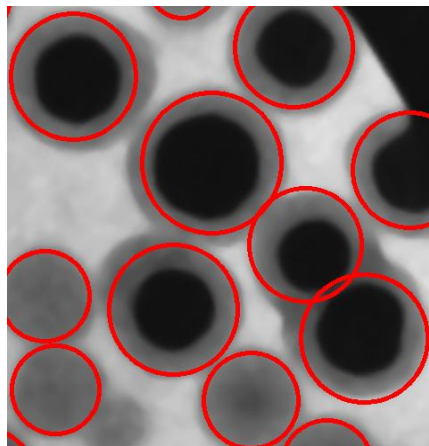
A detektált területek közül a metszeteket, nyúlványokat könnyen kiszűrhetjük, ha a hozzájuk tartozó sugár és az egybefüggő terület nagysága alapján vizsgáljuk. Az egybefüggő területek nagyságát az egyesítésük során számoljuk össze. Az egybefüggő terület sugara úgy jön létre, hogy vesszük az egybefüggő terület $X_{\max}-X_{\min}$, $Y_{\max}-Y_{\min}$ koordináták különbségét és a két szám közül a legnagyobbat választjuk. Azért választjuk a nagyobb értéket sugárnak, mert az objektumokat a körülírható körrel szeretnénk detektálni. Ha kiszámoljuk a detektált sugár alapján a sugárhoz tartozó kör területét és a kapott számmal elosztjuk a detektált egybefüggő terület nagyságát, akkor megkapjuk a detektált terület körszerűségét. A számítás alapján kapott eredményről (feltétel segítségével) eldönthető, hogy a megengedett körszerűség értéke alatt van, vagy még elfogadható a terület körszerűsége.

A detektált területek adatait egy CSV kiterjesztésű fájlba tároljuk, amelyek tartalmazzák a középponti koordinátákat és a hozzájuk tartozó sugarakat. Egy körrajzoló program segítségével visszarajzolom a detektált területek körvonalait (3.2.5. ábra).



3.2.5. ábra: Detektált területek közelítő eredményei

Jól látható, hogy a körvonalak általában kisebbek, mint a valódi kerámia területek szélei, hiszen ezek még csak közelítő körök (3.2.6. ábra).

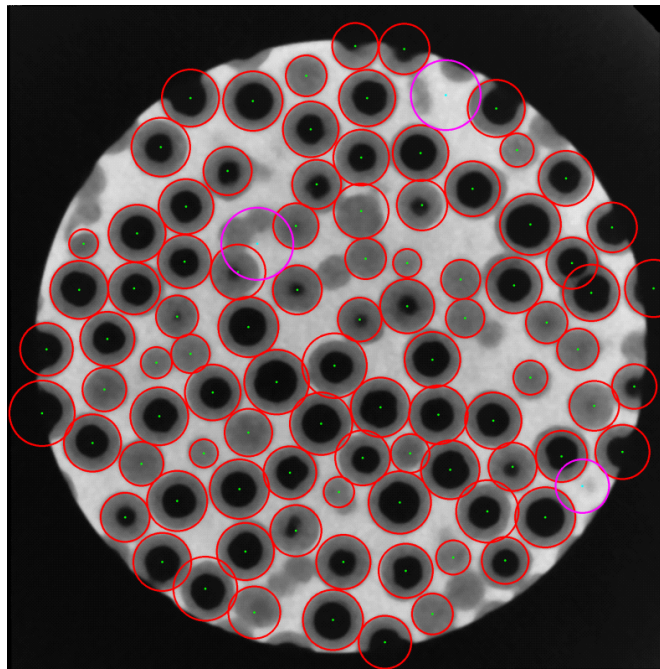


3.2.6. ábra: Közelítő körök a kinagyított képrészleten

Ahhoz, hogy a körszerű objektumokat a lehető legjobban illeszkedő körökkel detektáljuk, a HoughCircle találati eredményei közül az objektumok köré írható körökre van szükség. Ez azért fontos, mert az objektum köré írható körrel jelentősen csökkenthető a héjak és nyúlványok területei, amellyel pontosíthatjuk a detektált területekhez tartozó sugarakat, illetve

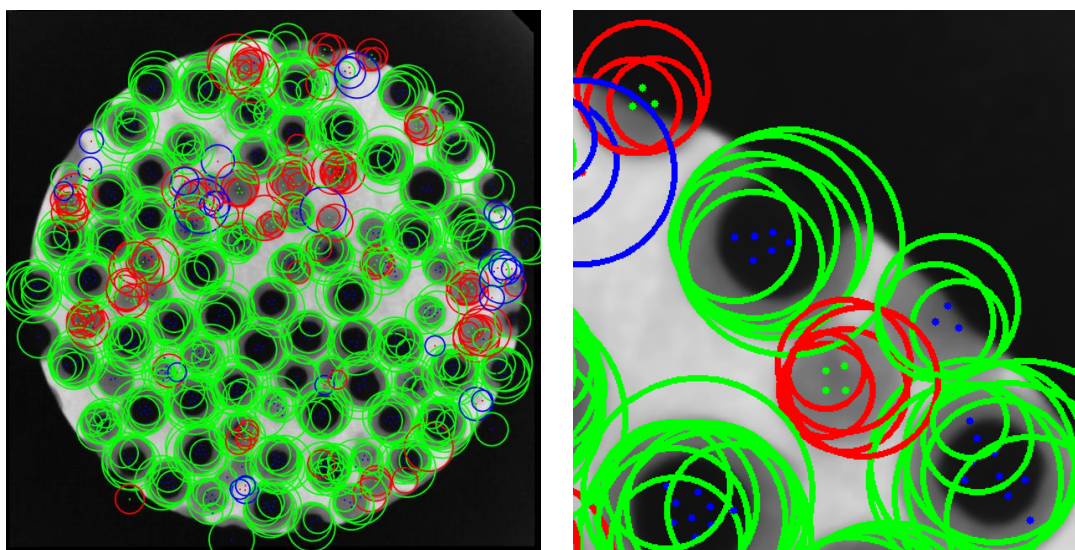
középpontokat. Az objektumok köré írható köröket két különböző szűrés eredményének összehasonlításával állítjuk elő.

Az első szűrés eredménye a közelítő körök halmaza (3.2.7. ábra).



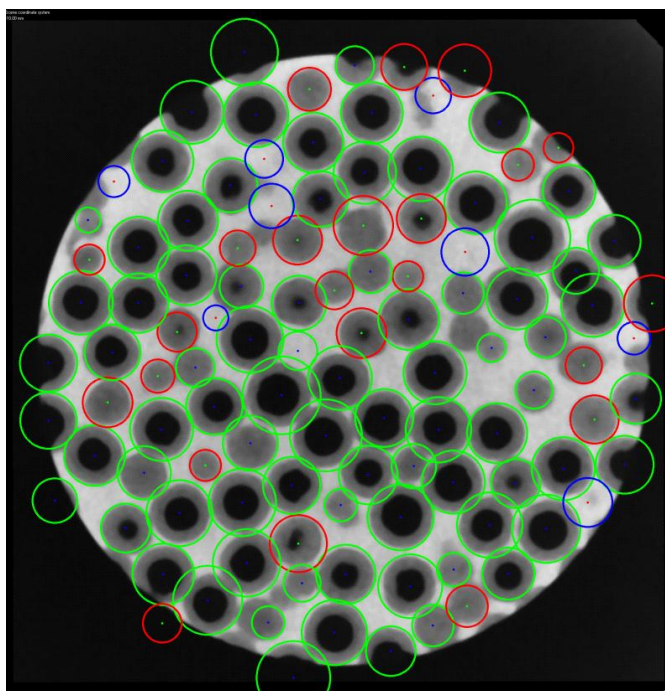
3.2.7. ábra Közelítő körök halmaza

A második szűrés eredménye egy olyan kép, amely tartalmazza minden körszerű kerámia objektumokhoz az összes lehetséges közelítő körvonalat (3.2.8. ábra).



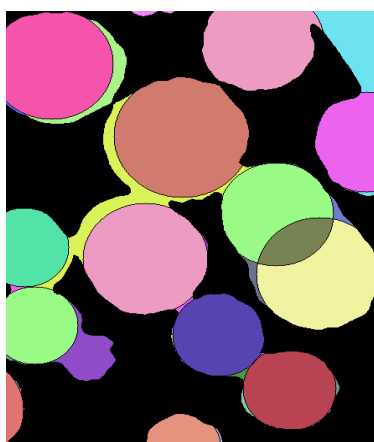
3.2.8. ábra Maximális körök keresése

A 3.2.8. ábrán látható körhalmazokból egy-egy közelítő kör közelében azt a legnagyobb sugarú kört választjuk ki, amelynek középpontja a közelítő kör középpontjától adott távolságon belül van. Ezt az adott távolságot tapasztalat szerint 20 pixelnnyi értékre választottuk (20 manuálisan kiértékelt metszet alapján). Az így választott maximális körök halmazát mutatjuk a (3.2.8. ábrán).



3.2.9. ábra: A kerámia objektumok köré írható befoglaló körök képe

A kerámia objektumok köré írható befoglaló körök képen futtatva az egybefüggő területek algoritmust, jobban illeszkedő köröket kapunk eredményül (3.2.9. ábra).



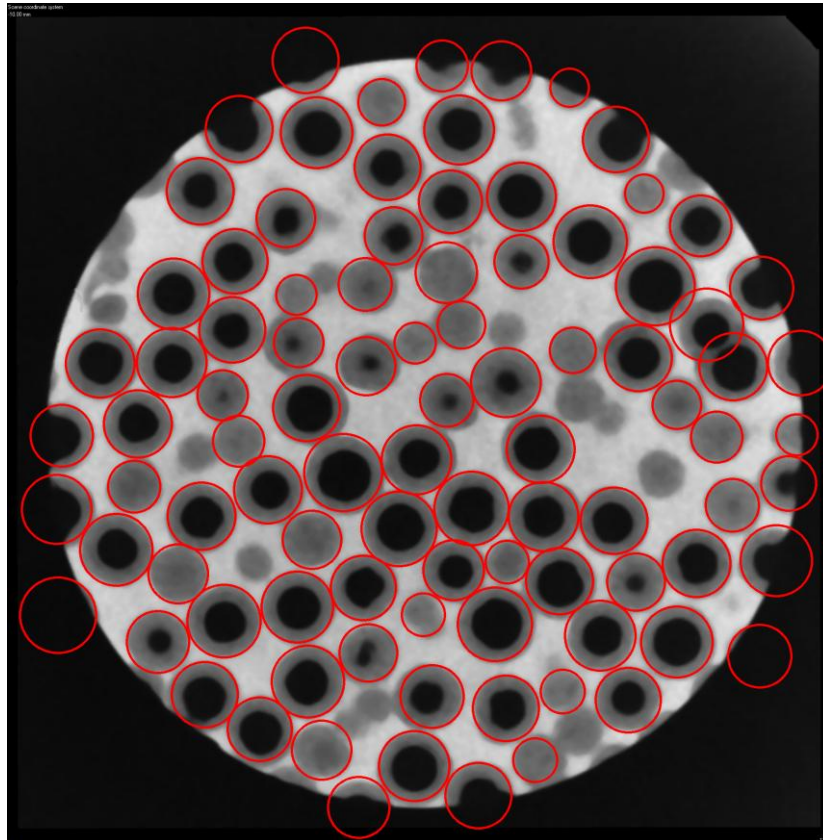
Első szűrési eredmény



Második szűrési eredmény

3.2.10. ábra: Egybefüggő területek keresése maximális körökre

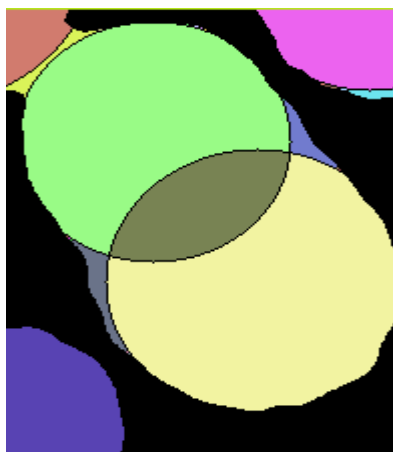
A 3.2.10. ábrán jól látható, hogy az első szűrési eredményen található sárga nyúlvány a második szűrési eredményen már jóval kisebb. A második szűréssel növeltük a valódi területek nagyságát. A detektált körök így jobban illeszkedőek lesznek, mint az első szűrés eredménye után. Az ábrákon látható körök 4 különböző szeleten láthatóak.



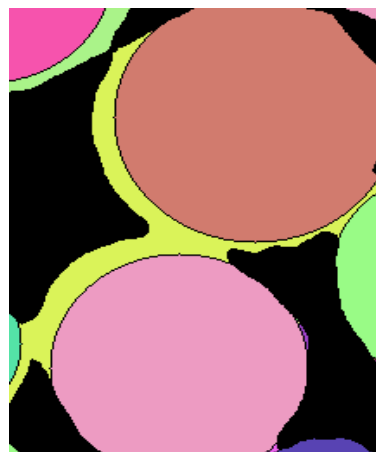
a: 00 metszet detektált területei

3.2.10. ábra Javított szűrés eredményei

A javított szűrés még mindig nem eredményez megfelelően jól illeszkedő köröket, ezért további közelítő szűrésre van szükség. A hiányos illeszkedés oka, hogy a szegmentálás során keletkező, metszet, nyúlvány, illetve héj rontja a detektált területek középpontjainak pontosságát és dekrementálja a sugár értékeit (3.2.11. ábra).



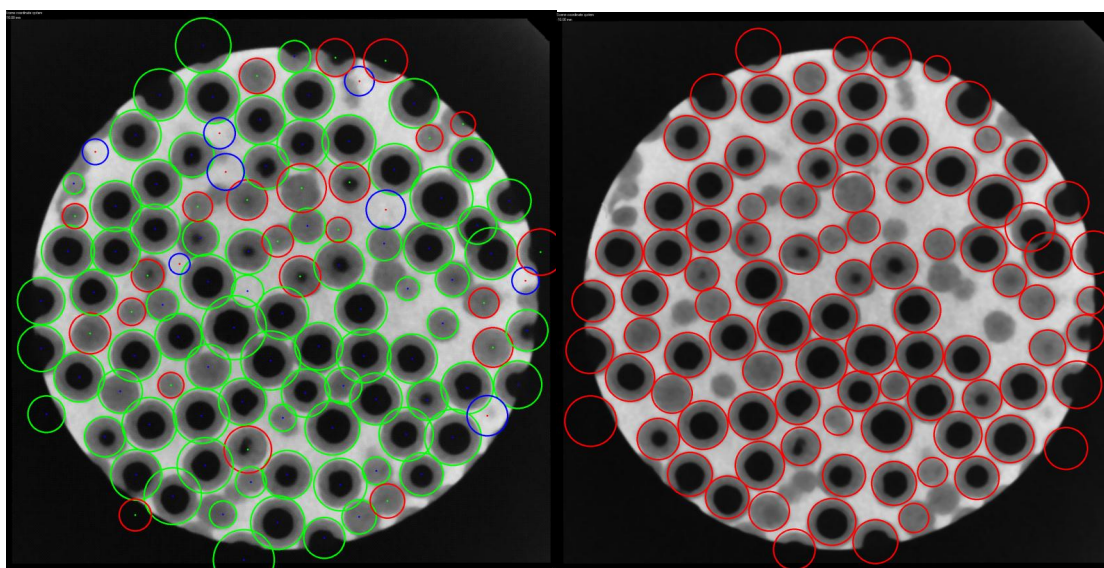
a: Metszet hiba



b: Héj hiba

3.2.11. ábra Szegmentálásból adódó hibák

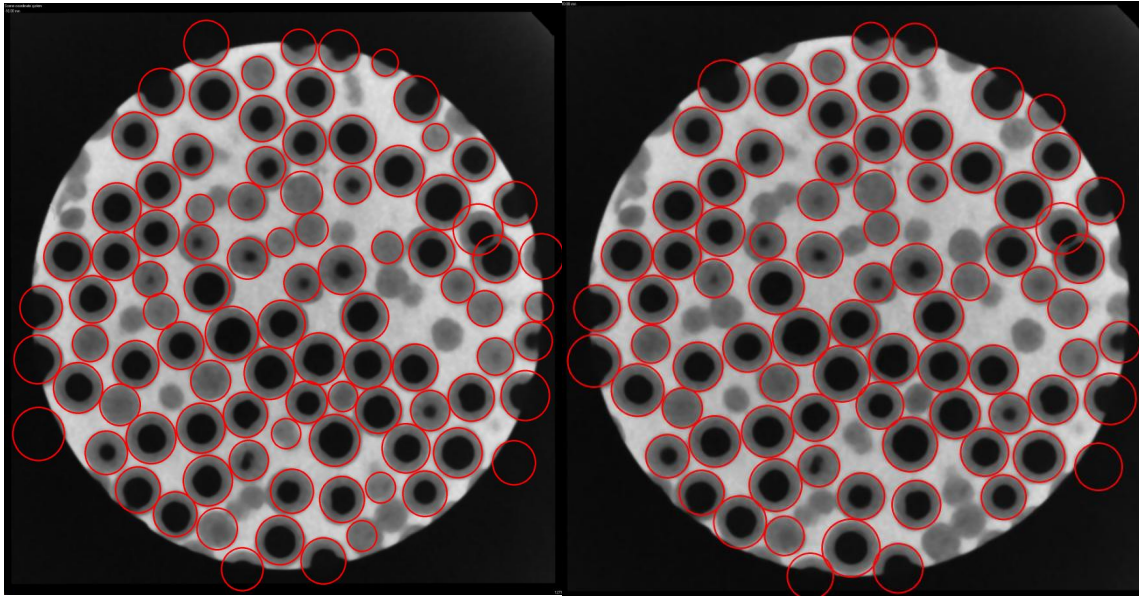
A szegmentálásból adódó hibákat egy olyan eljárással javítjuk, amellyel a rosszul illeszkedő középpontokat és dekrementált sugarakat a valódi teljes tartományból állapítjuk meg hiányzó részek nélkül. Az eljárás egy olyan szűrési sorozat, amely a meglévő hiányosan szegmentált kép eredményét többször újból szűri az eredetileg megállapított sugár 1.1 szeresével. A 10%-al növelt sugárral elérhető, hogy az eredetileg hiányosan érzékelt területek kiegészüljenek, ezzel elérve a héjak méretének csökkenését. Azokban az esetekben, ahol már elértem a tartományok széleit, azaz jól illeszkedő köreim vannak, ott a plusz 10%-os sugár nem eredményez további méretnövekedést, mert az újbóli szűréssel csak ugyan azt a színű tartományt keresem. A szűrési sorozat eredményének javulása a (3.2.12. ábra), (3.2.13. ábra), (3.2.14. ábra) alapján követhető.



a: Eredetileg szegmentált kép

b: Eredetileg szegmentált kép szűrési eredménye

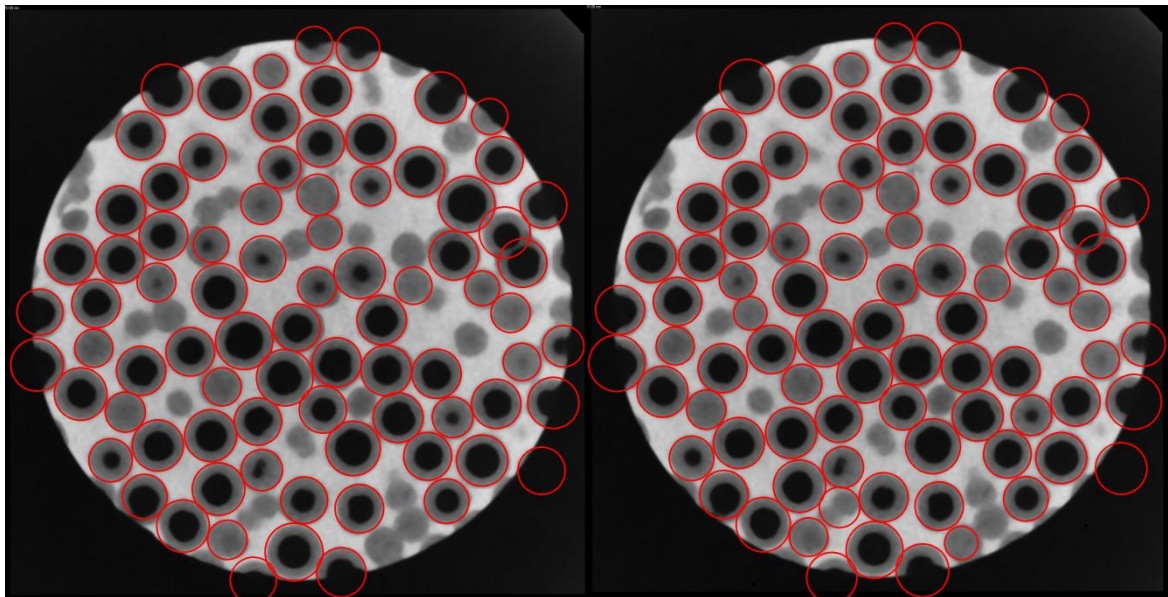
3.2.12. ábra Első szűrés



a: Eredetileg szegmentált kép

b: Eredetileg szegmentált kép szűrési eredménye

3.2.13. ábra Második szűrés

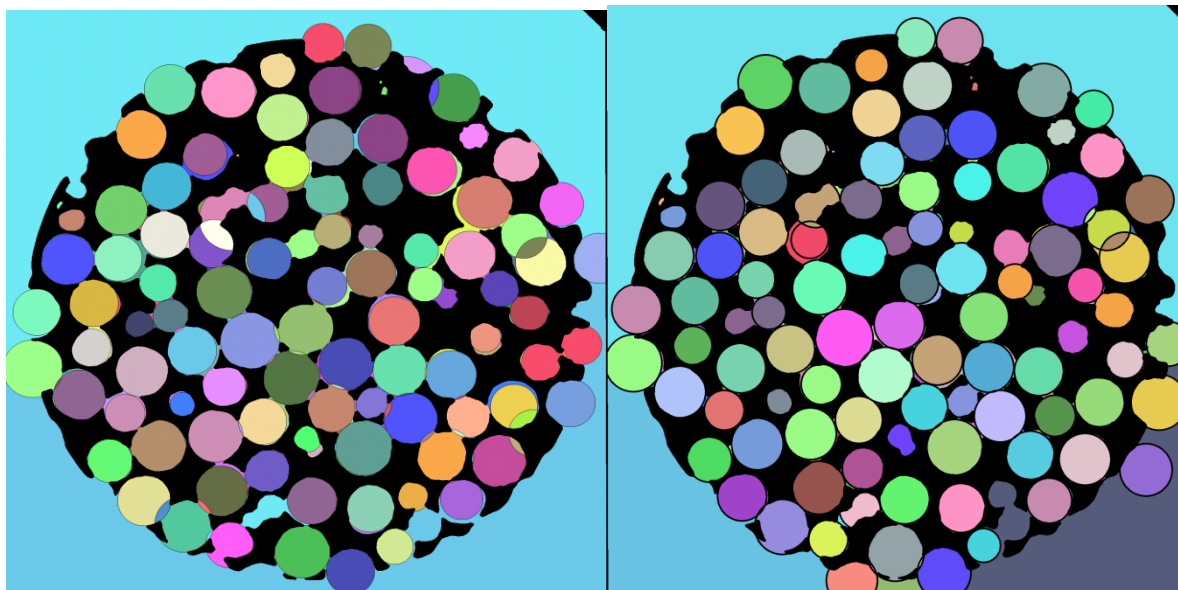


Eredetileg szegmentált kép

b: Eredetileg szegmentált kép szűrési eredménye

3.2.14. ábra Harmadik szűrés

A szűrések következtében bekövetkező javulások a szűrés eredmény képén látható (3.2.15 ábra).

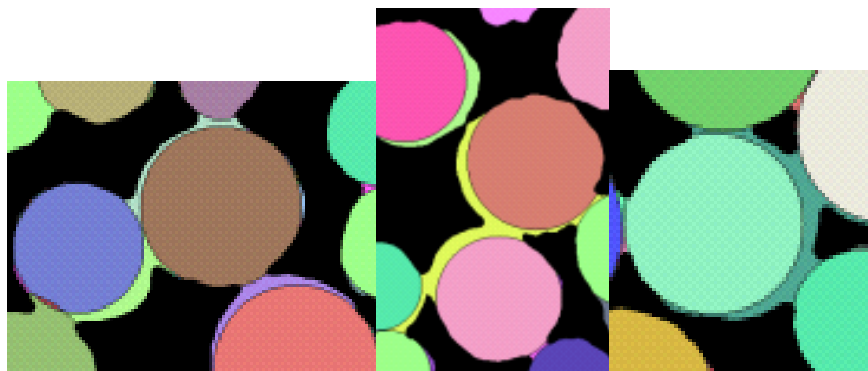


a: Első szűrés eredménye

b: Második szűrés eredménye

3.2.15. ábra Első szűrés hibái

Az eredmény javulását, a hibarészletek képein tovább szemléltetjük (3.2.16 ábra) (3.2.17 ábra).



a: első hiba

b: második hiba

c: harmadik hiba

3.2.16 ábra első szűrésnél keletkező hibák



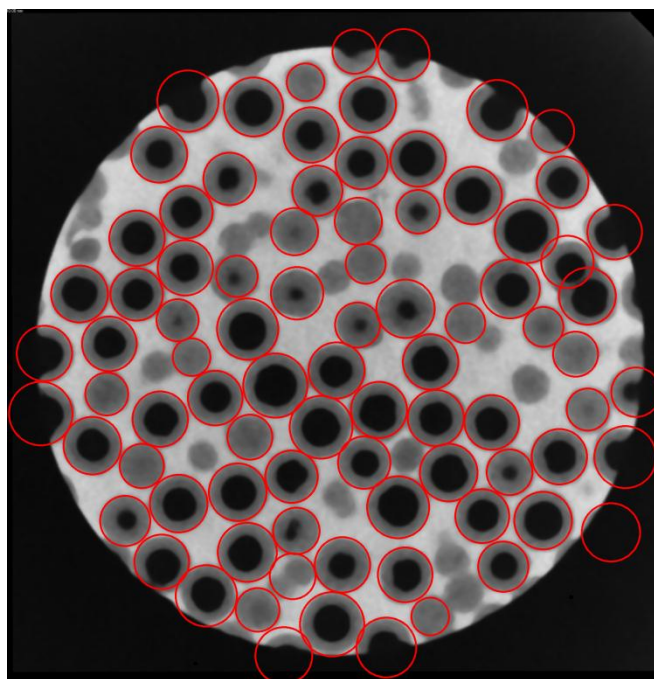
a: első hiba

b: második hiba

c: harmadik hiba

3.2.17 ábra harmadik szűrésnél keletkező hibák

Jól látható, hogy az első szegmentálásból adódó héjak és átmetszések kisebbek lettek. A módszerrel teljesen eltüntethető a héjból származó hibák, így teljes mértékben rekonstruálható a teljes tartomány (3.2.18 ábra).



3.2.18 ábra A végeredmény képe

A meglévő eljárásnál csak akkor keletkezhet hiba, hogy ha a sugár értékét 10%-nál nagyobbra növeljük, mert a túl nagy sugarú körök a szomszédos tartományokba nagy belemetszéseket okozhatnak. Tehát fontos, hogy több szűréssel és kisebb sugár léptékkel egészítsem ki a hiányos tartományokat. Az eljárás hosszadalmas, de tetszőleges körszerű alakzatra

alkalmazható a terület kiegészítő eljárás. Fontos, hogy csak abban az esetben alkalmazható az algoritmus, ha a tartomány az R, G, B kódja alapján azonosítható.

A detektált területek nagyságát pixelben határozzuk meg, amelyet elosztunk az általunk megállapított sugár alapján számolt kör területével. Ezzel meghatározható az alakzat körszerűsége. A szükséges szűrések addig folytatódnak, amíg talál még olyan területeket, amelynek a körszerűsége 100%-os. Abban az esetben, ha a detektált területek körszerűsége 100%-ról 95%-ra változnak, akkor a keresendő tartomány szélét elhagytuk, így teljesnek tekinthetjük a tartomány méretét. Ha leállítottuk a sugár értékkel növelt szűrést, akkor már csak az utolsó szűrést kell elvégezni. Az utolsó szűrésnél a szűrési feltételben szereplő R sugár értéke 10%-os növelt érték nélkül szerepel, így már a teljes tartományhoz tartozó eredeti sugár érték, illetve középponti koordinátákat értékeljük ki.

Az algoritmus reverzibilis, tehát a hiányos tartományok megállapítása nem csak növelési módszerrel, hanem csökkentési módszerrel is megállapítható a hozzájuk tartozó körszerűség feltételének megadásával.

A képeken átlagban 1-2 detektált terület körvonala hibás a 100-120 körből.

Körülbelül 1-2%-os hibapontossággal megállapítható a képeken található körszerű objektumok középpontjai és sugarai.

A tartományok körszerűségén alapuló algoritmus működésének ismertetése

Az egybefüggő területek detektálására egyik leggyakrabban alkalmazott algoritmus a *söprögetési eljárás (FloodFill algoritmus)*. Az algoritmus tömbindexeléssel tölti fel a pixelek értékeit úgy, hogy a nyilvánvalóan azonos csoporthoz tartozóak kapnak indexet. A vizsgálatot különböző irányokba végezzük el (fel, le, jobbra, balra). Minden alkalommal, amikor észreveszi, hogy két szomszédosnak van belső szomszédos tartománya, akkor beírja a nagyobb indexű elemek helyére a kisebb indexűek számát. Egy változóval mérjük a területek közötti változást (0 vagy 1 érték), amely vezérli az indexelés menetét. Ha nem észlelt külső kapcsolatot, akkor az algoritmus leáll. Az összefüggő tartományok keresése r, g, b kód alapján történik, amely tartalmazza a keresendő területek szűrési feltételét. Az egybefüggő területeket véletlen számmal generált r, g, b értékekkel rajzoljuk vissza az eredmény képére.

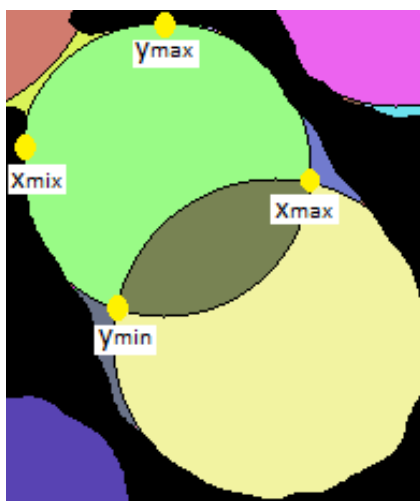
A programmal detektált egybefüggő területek (tartományok) nagyságát pixelben adjuk meg. Az egybefüggő területeknél megállapított körök középpontjait a tartományok x és y irányú szélső pixeleinek koordinátái ($x_{\max}$, $x_{\min}$ és $y_{\max}$, $y_{\min}$) segítségével definiáljuk.

Szűrési feltételek:

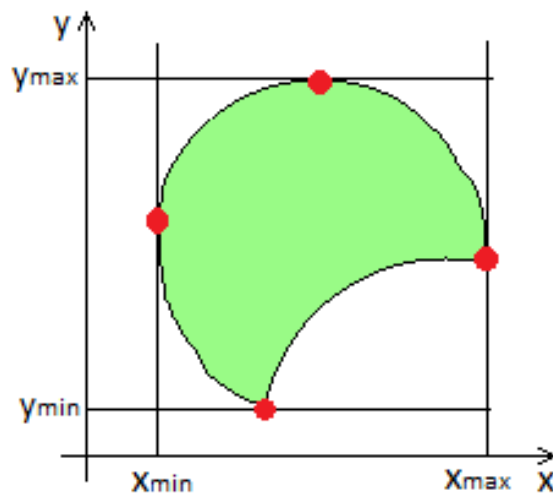
Összehasonlítjuk a tartomány területét a fenti képletekkel kalkulált, a tartományhoz rendelt r_i sugarú kör területével. Ha a két terület közel azonos (10%-on belüli eltérést vettünk közel azonosnak), akkor körszerűnek tekintjük a tartományt, és a hozzárendelt r_i sugarú kör lesz a tartományra illesztett kör.

A kör középpontját a tartomány köré illesztett téglalap súlypontjaként értelmezzük.

A detektált terület súlyponti koordinátáját, a tartományhoz tartozó szélső koordinátái alapján számoljuk ($x_{\min}$, $x_{\max}$, $y_{\min}$, $y_{\max}$). A számolás menetét egy példán keresztül személtetjük. A keresendő tartományunk a zöld színű terület (3.2.19. ábra).



a: Zöld terület szélső koordinátái



b: Zöld terület koordináta rendszerben

3.2.19. ábraA tartomány szélső koordinátái

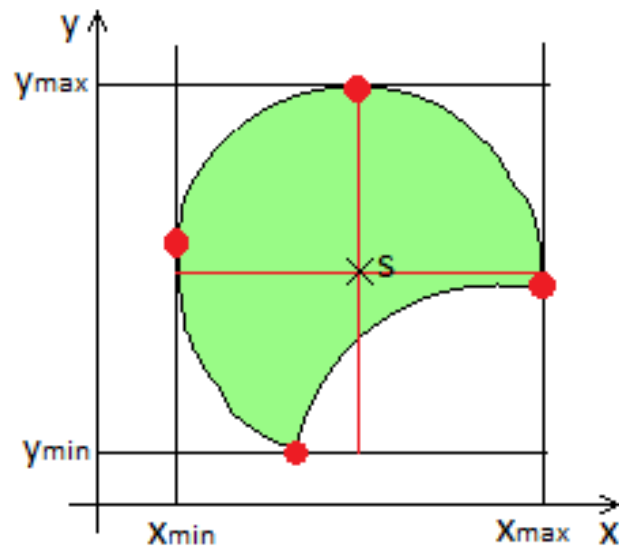
A középponti koordináták számítása:

$$S_i = (x_i; y_i) = (x_{\min} + ((x_{\max} - x_{\min})/2) ; y_{\min} + ((y_{\max} - y_{\min})/2))$$

S_i : tartományok súlypontjai

$x_{\min}$: a tartomány legkisebb x koordinátája $x_{\max}$: a tartomány legnagyobb x koordinátája

$y_{\min}$: a tartomány legkisebb y koordinátája $y_{\max}$: a tartomány legnagyobb y koordinátája



3.2.20. ábra S súlypont meghatározása

Sugár megállapítása a következő képen alakult:

Kiszámoljuk $((x_{\max}-x_{\min})/2)$ és $((y_{\max}-y_{\min})/2)$ kifejezéseket, majd a nagyobbat megválasztjuk sugár értéknek.

$$r_{ix} = ((x_{\max}-x_{\min})/2)$$

$$r_{iy} = ((y_{\max}-y_{\min})/2)$$

If $(r_{ix} < r_{iy})$

{

$$r_i = r_{x2}$$

else

$$r_i = r_{y1}$$

}

r_i : tartományokhoz tartozó sugár

r_{ix} : x koordinátákból számolt sugár

r_{iy} : y koordinátákból számolt sugár

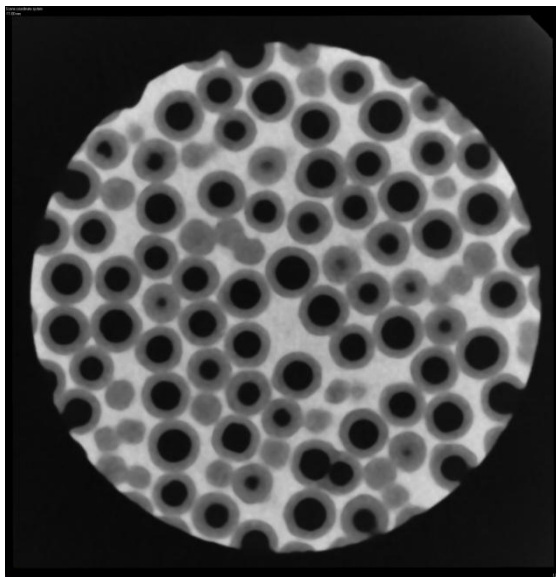
3.3. Rádiuszinkrementálás módszere

A rádiusz inkrementálás módszerét úgy terveztük, hogy a lehető legjobb középpontból kiindulva növeli a sugarat és közben korrigálja az origó koordinátáit.

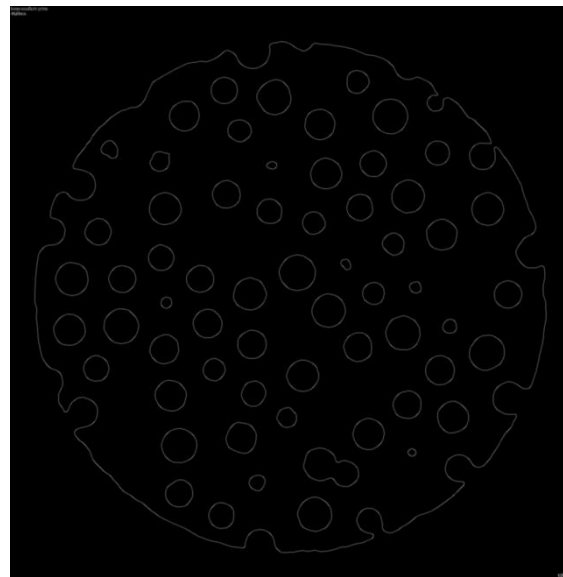
3.3.1. Belső körök

Az algoritmus első feladata, hogy a képet úgy alakítsa át, hogy a kerámia kompozitban lévő apró légbuborékokat fel lehessen ismerni, azaz szegmentálja őket. Azért esett erre a választás, mert a kerámia és a levegő részek között a legerősebb a kontraszt, ebből következik, hogy könnyebben detektálható.

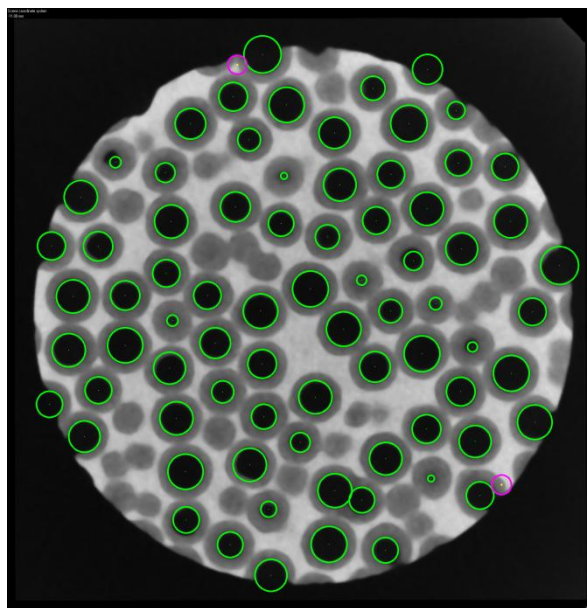
A belső körök detektálására ugyanúgy, előbb threshold eljáráson majd Cannyélkeresésen és Gauss simításon esik át a CT szelet, akárcsak a meglévő algoritmusok kiegészítésével alkalmazott módszernél. Beállításokban különbözik annyiban, hogy a threshold alsó határértékét a kerámia és a levegő szín intenzitásai közé essen. Az átalakítás után a belső körök egyszerűen detektálhatók (3.3.1. ábra).



3.3.1.a, ábra: Eredeti kép



3.3.1.b, ábra: Átalakítás utáni kép



3.3.1. c ábra: Detektált belső körök az eredeti képen

3.3.2 Rádiuszinkrementálás

Miután meghatároztuk a kiindulási középpontokat és sugarakat, elkezdődhet a sugár növelése. A növekedést a megfelelő pontban le kell állítani, meg kell határozni, hogy hol van a vége kerámia gömbhéjaknak, és hol kezdődnek a fém részek. A kettő között található egy átmeneti rész is, amit szintén figyelembe kell venni a leállításkor.

Az algoritmusunk minden egyes inkrementáláskor a körvonalon lévő pixelek színintenzitását vizsgálva dönti el, hogy a körvonal elérte-e a kerámia szélét. Ezeket az intenzitásokat előfordulásuk arányában vizsgáljuk. Megkülönböztetünk négy ilyen számosságot.

- Magas intenzitásúak: intenzitás < 130 *
- Alacsony intenzitásúak: intenzitás ≤ 130
- Extrém magas intenzitásúak: intenzitás > 163 **
- Extrém alacsony intenzitásúak: intenzitás < 20 ***

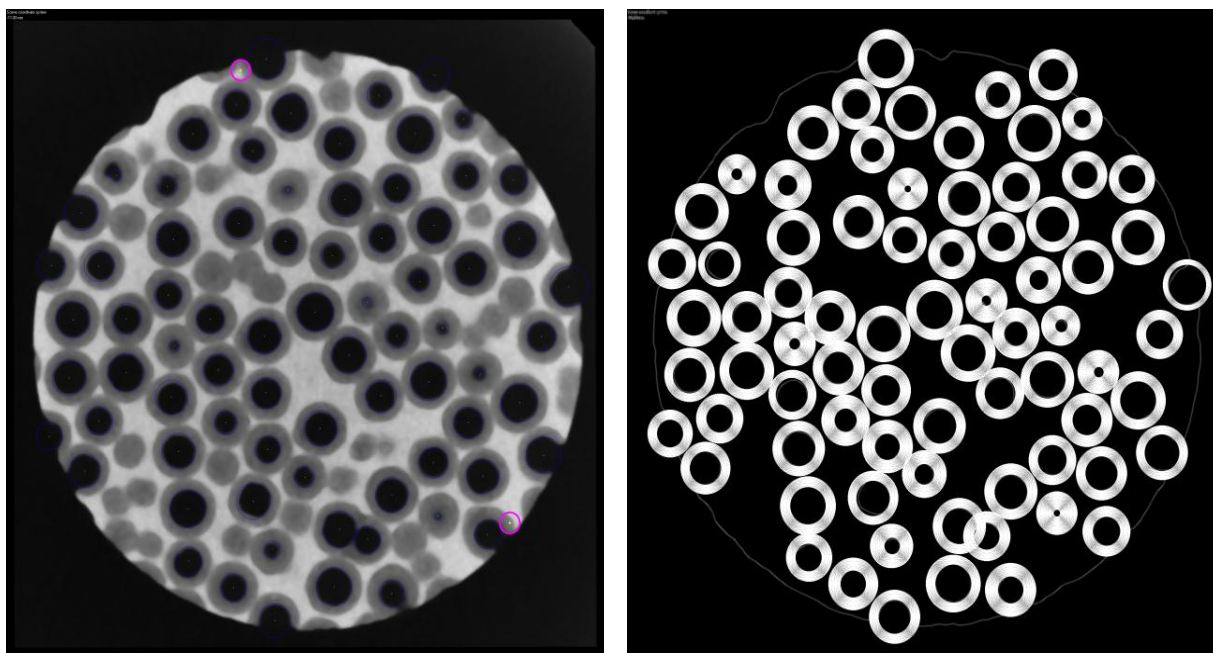
* A 130-as intenzitás a kerámia és fém részek közötti átmenetben van.

** A 163-as intenzitás már egyértelműen fém részeknél jelentkezik.

*** A 20-as intenzitás már egyértelműen levegő részeknél jelentkezik.

Az eljárás ezen intenzitások számosságának egymáshoz viszonyított aránya alapján számol és dönti el, hogy elértük-e a kerámia szélét. A magas és alacsony intenzitások arányának el kell érni az 1:1 arányt. Az extrém nagy és alacsony intenzitásoknak az 1:5, és az extrém kicsi és

alacsony intenzitásoknak a 4:5 arányt. (3.3.2. ábra) Utóbbi kettő csak akkor érvényes, ha már találtunk legalább egy extrém magas körvonalon lévő pontot. Egyébként csak az első aránypárt vizsgáljuk. Ha találtunk ilyen extrém magas pontot és ez a két intenzitás arány nem megfelelő, akkor tovább fut a keresés, mivel ez azt jelenti, hogy sok alacsony intenzitásunk van, de mégis találtunk egy egyértelműen fém részt reprezentáló pontot. Ez azt is jelenti egyben, hogy a középpont rossz helyre került, így előbb korrigálnunk kell és csak az után szabad tovább növelni a rádiuszt, de csak akkor, ha az még mindig szükséges.



3.3.2. ábra: Belső körök - inkrementált kép

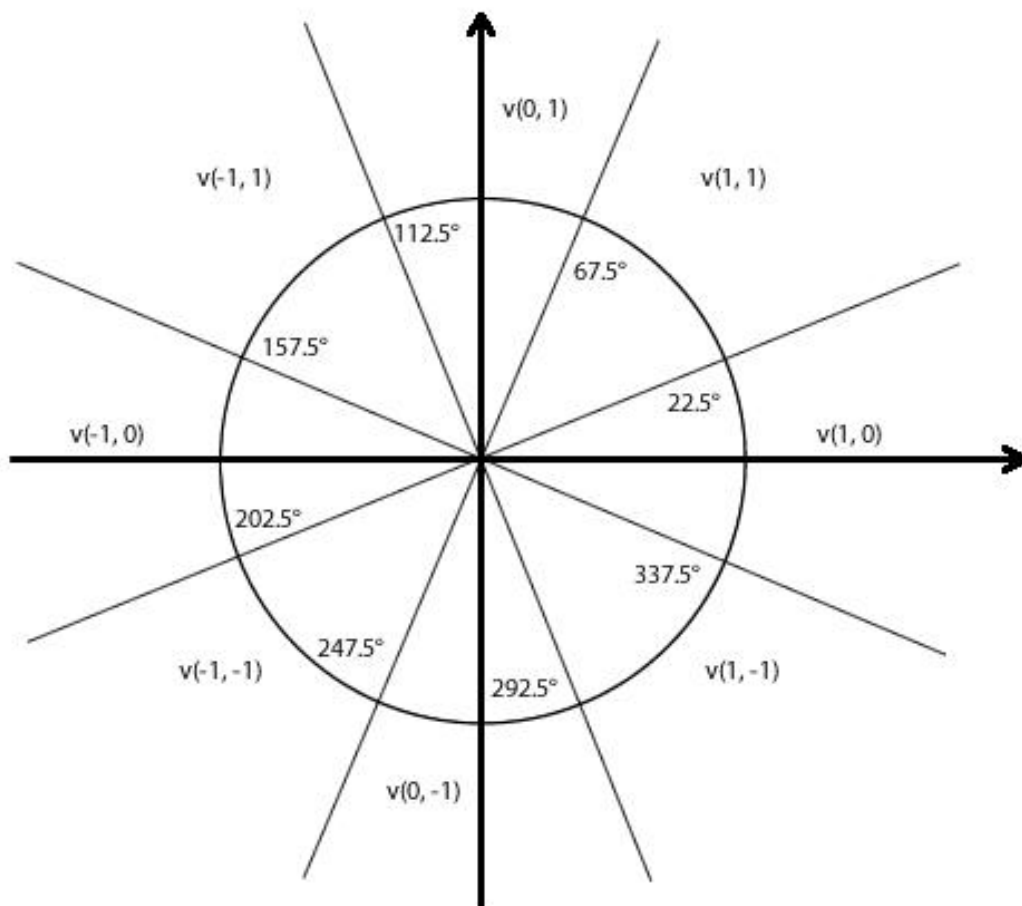
3.3.3 Origó korrekció

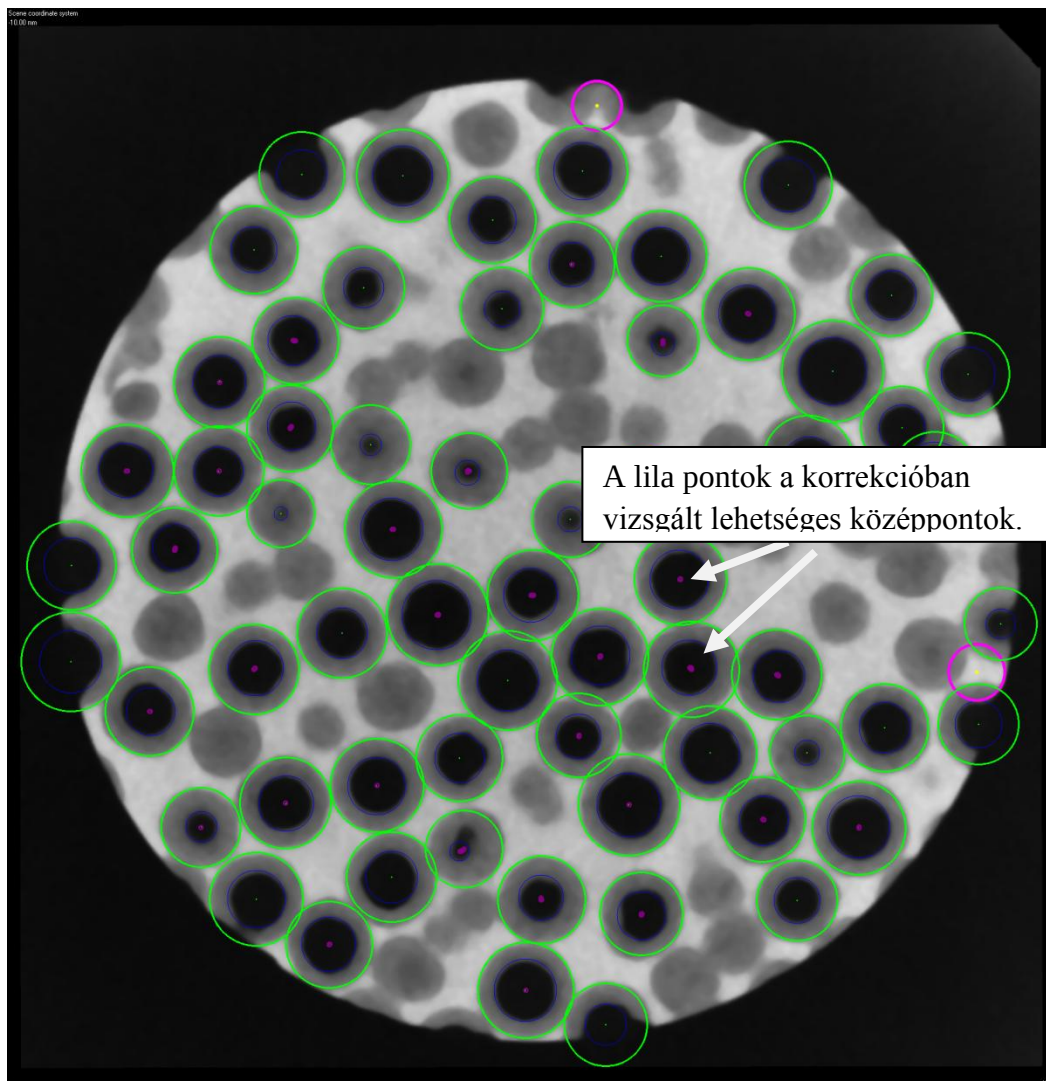
Amikor a gömbhéj külső és belső köre nem koncentrikus, a külső és belső körök középpontja nem esik egybe, akkor a külső kör középpontját javítani kell. A korrekció úgy zajlik, hogy a körvonalai pixelek alacsony intenzitású pontjai felé egyszerre csak a lehető legkisebb léptékben mozduljon el. Ez után a vezérlést az inkrementálás visszkapja és eldönti, kell-e még korrigálni a középponton.

Az irányt úgy határozzuk meg, hogy a középpontból az alacsony – 130 –nál kisebb – intenzitások felé mutató vektorok eredőjét számoljuk ki. Ennek az eredőnek meghatározzuk a meredekségét, ami egyenlő a vektor szögének tangensével.

Ezt a tangens értéket alapul véve nyolc irányba osztjuk be az elmozdulást 45°-os intervallumokban.

- 0° - 22.5° és 337.5° - 0° intervallumban: $v(1, 0)$ szerinti elmozdulás
- 22.5° - 67.5° intervallumban: $v(1, 1)$ szerinti elmozdulás
- 67.5° - 112.5° intervallumban: $v(0, 1)$ szerinti elmozdulás
- 112.5° - 157.5° intervallumban: $v(-1, 1)$ szerinti elmozdulás
- 157.5° - 202.5° intervallumban: $v(-1, 0)$ szerinti elmozdulás
- 202.5° - 247.5° intervallumban: $v(-1, -1)$ szerinti elmozdulás
- 247.5° - 292.5° intervallumban: $v(0, -1)$ szerinti elmozdulás
- 292.5° - 337.5° intervallumban: $v(1, -1)$ szerinti elmozdulás
- A kör középpont eltolások addig folytatódnak, míg az inkrementálás úgy nem látja, hogy megfelelő helyen van a középpont. (3.3.3. ábra)
-



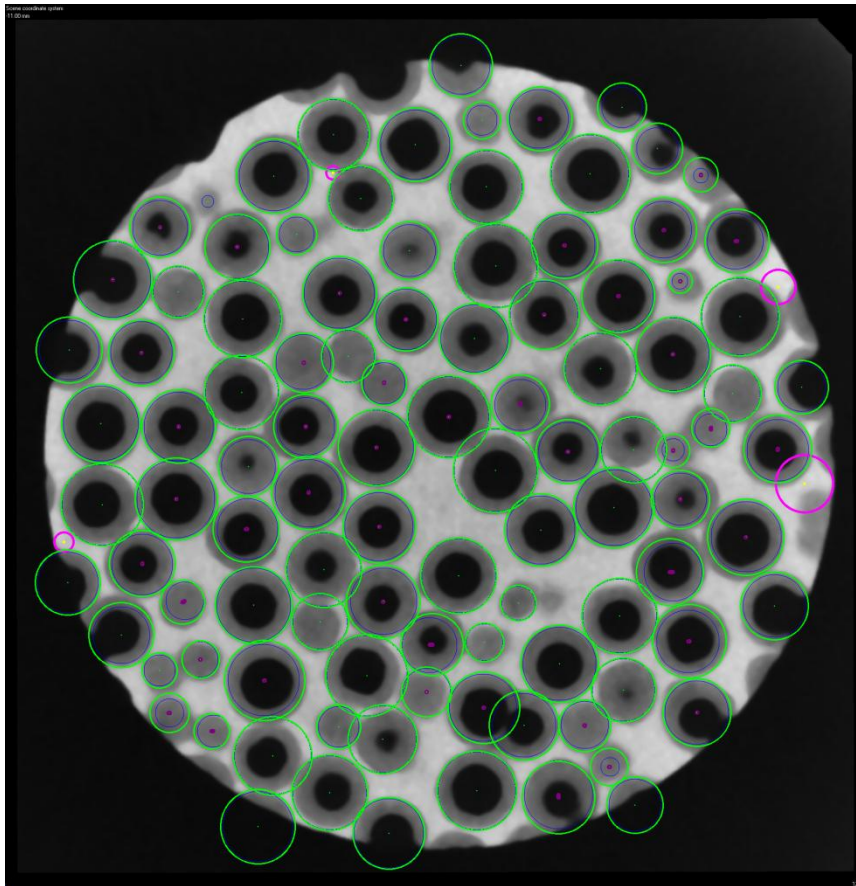


3.3.3. ábra: Az elmozdulások

3.3.4 A módszerből levonható következtetések

Ezzel a módszerrel kapott körök jól illeszkednek, olyan szélsőséges esetekben is, amikor az egyes alakzatok nagyon közel vannak egymáshoz, vagy metszik egymást, vagy amikor a belső légbuborék középpontja nem egyezik meg a külső héj origójával. A módszer a metszeti kereséssel javít, a metszetek együttes vizsgálata (3.1.3. Analízis) így még pontosabbá válik.

A módszer működésénél fogva csak olyan alakzatokkal dolgozik, melyeknek létezik belső körük. A többi alakzat detektálása is lehetséges, akkor, ha a threshold alsó értékét a kerámia és fém területek közti színátmenet legsötétebb értékére állítjuk (3.3.4. ábra).



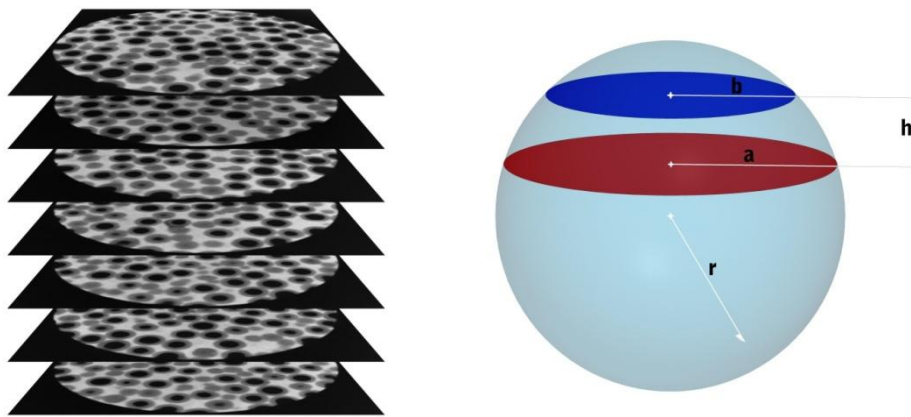
3.3.4. ábra: Minden kör

3.4 Összehasonlítás

Véleményünk szerint a HoughCircle algoritmus jó körkereső algoritmus, de érzékeny a szabálytalanságokra és összetett előfeldolgozási eljárásokat igényel. Ezzel szemben a saját tervezésű eljárás jobban detektálja a körszerű alakzatokat, kevésbé érzékeny a változásra és pontosan illeszti a körvonalakat. Előnye még a saját megoldásoknak, hogy nem igényelnek gyakori beállításokat. Mindent összevetve, az új módszerek egyszerűbbek, pontosabbak, robosztusabbak, de lassabbak, mint a HoughCircle módszer, amely gyors, de komplikált és az esetek többségében kifogásolható eredményt produkált a CT rétegfelvételek kiértékelései során.

4. Számítógépes modell generálása

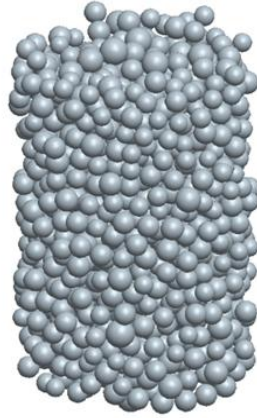
A kördetektáló algoritmus eredményeit adatbázisban rögzítettük: rétegenként az összes detektált kör paramétere rögzítésre került (külső vagy belső kör, $x - y$ koordináta, rádiusz). A rétegenként összetartozó (azonos $x - y$ koordináta) köröket az adatbázisban az 4.1. képlet alapján gömb paraméterekké ($x - y - r$) rendeztük. Az adatbázis adatit szöveg file-ként mentettük.



4.1. ábra:rétegfelvételek köreiből származtatott gömb paraméterek

$$r = \sqrt{\frac{\left[(a-b)^2 + h^2 \right] \left[(a+b)^2 + h^2 \right]}{4h^2}} \quad (4.1)$$

CAD rendszerekben a gömb modellezése csak vázlat alapú modellezéssel történhet. Ez azt jelenti, hogy egy kiserkesztett félkör vázlatból forgatással állítjuk elő a gömb építőelemet. A munkánkban szereplő próbatest mintegy 3600 ($2 \times \sim 1800$) gömb építőelemet tartalmaz, ami kizárja az elemek egyesével történő modellezését. Az általunk használt *PTC Creo 2.0* gépészeti szoftver eszköztárában szerepel egy kiosztás (pattern) parancs, amely lehetővé teszi koordináták szerinti mintázat generálását. Ez azt jelenti, hogy elég a egy gömböt modellezni, majd a paramétereit hozzárendelni az adatbázis elemeihez ($x - y - r$). A szoftver – némi idő után – generálja a gömböket (4.2. ábra). Külön alkatrész file-ként építettük fel a külső- valamint a belső gömbhéjakat, valamint a mátrix henger próbatestet.



4.2. ábra: CAD rendszerben rekonstruált külső gömbháj modellek

5. Konklúzió

Munkánk során arra törekedtünk, hogy a legpontosabb rekonstrukciót tudjuk elkészíteni a CT szkennelt próbatestről. A hagyományos képfeldolgozási módszerek nem bizonyultak hatékonynak a speciális feladat megoldásában, ezért párhuzamosan végeztünk két feladatot:

- új algoritmusokfejlesztésével megoldani a problémát
- egy új algoritmus fejlesztésével megoldani a kördetektálási problémát.

Végeredményben elmondhatjuk, hogy mindkét saját fejlesztésű módszerünk hatékonyan működik – egyenlőre szemrevételezés alapján. A TDK munkát a későbbiekben – akár szakdolgozat formájában folytatni szeretnénk, egyértelmű célunk a kör illesztések pontosságának vizsgálata is.

Köszönetnyilvánítás

A TDK dolgozatban ismertetett kutató munka a **TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029** jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] NihadDukhen:*Metal Foams: Fundamentals and Applications*, DEStechPublications Inc.,(2013)
- [2] Németh Árpád, Orbulov Imre Norbert:*Fémhabok, porózus fémanyagok előállítása és tulajdonsága*, ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA 16:(2) pp. 58-66. (2006)
- [3] Orbulov Imre Norbert: *Porózus szerkezeti anyagok*, Előadás fólia,
<http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAGM6/letoltes> ,letöltés ideje: 2013.11.14
- [4] M. F. Ashby, A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck: *Metal foams: a design guide*, Cambridge Centre forMicromechanics, (1998)
- [5] Julien Noel, North Star: *Advantages of CT in 3D Scanning of Industrial Part*-Imaging Inc - 3D ScanningMagazine, (2008)
- [6] Kozma István: *A komputertomográf ipari alkalmazásai*, A Jövő Járműve: Járműipari innováció (3-4) pp. 8-11. (2010)
- [7] Marius C. Codrea, Olli S. Nevalainen: Note: *An algorithmforcontour-basedregionfilling*, Computers&Graphics, Volume 29, Issue 3, ,Pages 441–450 (2005)
- [8] <http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/threshold/threshold.html>letöltés ideje: 2013.11.14
- [9] Stuart Russell, Peter Norvig: *Mesterséges Intelligencia Modern Megközelítésben*, Panem Kiadó, Budapest, 2006.
- [10] http://docs.opencv.org/modules/core/doc/operations_on_arrays.html#inrangeletöltés ideje: 2013.11.14