Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szűcs András

Számítógépes látáson alapuló térfogatmérés gáz-folyadék elegyekben

KONZULENSEK

Dr. Blázovics László
Dr. Szűcs Rózsa

BUDAPEST, 2017

TARTALOM

Összefoglaló 4

Abstract 5

1 Bevezetés 6

1.1 Számítógépes látás 6

1.1.1 Számítógépes látás a hétköznapokban 7

1.1.2 Gépi látás az iparban 8

1.1.3 Gépi látás a kémiában 9

1.2 Áramlásos kémia 10

1.2.1 Kiscsatornás Taylor-áramlás 10

2 Az alkalmazás elkészítése 15

2.1 A mérési elrendezés 15

2.1.1 Áramoltatás 15

2.1.2 Csőválasztás 17

2.1.3 Fényviszonyok 18

2.1.4 Buborékok láthatósága 19

2.1.5 Gázmérés 21

2.1.6 Végső mérési összeállítás 23

2.2 Felhasznált eszközök 24

2.3 Algoritmusok 25

2.3.1 Detektálás 25

2.3.2 Zavarszűrés és jelerősítés 31

2.3.3 Követés 36

2.3.4 Térfogatszámítás 39

2.3.5 Objektum hosszának kinyerése 41

2.4 Implementálás 42

2.4.1 Inicializálás ... 43
2.4.2 Feldolgozás ... 43
3 Tesztelés ... 46
3.1 Valós idejű feldolgozás ... 46
3.1.1 Feldolgozási idő ... 47
3.1.2 Robusztusság ... 48
3.1.3 Valós idejű feldolgozás összefoglalása ... 49
3.2 Módszer alkalmazhatósága ... 50
3.2.1 Referenciaértékek pontossága ... 50
3.2.2 Videós kiértékelés pontossága ... 52
4 Konklúzió ... 60
5 Köszönetnyilvánítás ... 61
6 Hivatkozások ... 62

ÖSSZEFOGLALÓ

Számos művelet automatizálása bír kiemelt társadalmi és gazdasági jelentőséggel, az ez által megnövelt termelékenység, hatékonyság, valamint biztonság miatt. A számításkapacitás növekedése, valamint a képkészítés és feldolgozás eszközeinek fejlődése olyan új lehetőségeket tártak fel ehhez, melyek túllépnek a korábban csupán emberi munkaerő segítségével kivitelezhető technológiákon.

A számítógépes látás használatára ma már számos hétköznapi, ipari, valamint kémiai alapokon nyugvó példát lehet hozni, és felhasználási köre a jövőben vélhetően tovább fog szélesedni. Ilyen felhasználási terület lehet a kiscsatornás áramlási rendszerekben gyakori Taylor-áramlás vizsgálata is. A folyadék- és gázfázis határainak automatikus kiértékelésével lehetővé válik a gázbuborékok, valamint a folyadékdugók hosszának meghatározása. Ez fontos paraméter a nyomásesés, valamint a hő- és anyagtranszfer megjóslásában,[1] továbbá lehetőséget nyújthat az áthaladó gázbuborékok térfogatának (és ebből levezetve térfogatáramának) a meghatározására. Ezek áramlásos katalitikus hidrogénezési reakciók, hőátadási műveletek során és egyéb áramlásos kémiai reakciók során is előnyösen felhasználható. Célom egy olyan térfogatmérő alkalmazás kifejlesztése volt, mely sikeresen alkalmazható a kiscsatornás kétfázisú áramlási rendszerekben gyakori Taylor áramlás esetén.

A dolgozat során – a felvételek elkészítésére és az alkalmazás tesztelésére – létrehozott mérési elrendezés, valamint a C++ és OpenCV segítségével készített alkalmazás fejlesztésével kapcsolatos megfontolások kerülnek tárgyalásra. Az alkalmazás jóságának meghatározásakor nem csak a térfogatmérés pontossága, hanem a valós idejű feldolgozás kritériuma is vizsgálatra került. A tesztek alapján az elkészített alkalmazás képes – az említett körülmények között – valós időben, a manuális gázmérés helyettesítésére.

[1] R. Gupta, D. F. Fletcher, and B. S. Haynes, “Taylor Flow in Microchannels: A Review of Experimental and Computational Work,” *J. Comput. Multiph. Flows*, vol. 2, no. 1, pp. 1–31, 2010.

ABSTRACT

The automation of processes has an enormous social and economic impact due to its ability to improve productivity, efficiency and safety. The increase in computational capacity, the advances in image acquisition and processing have provided the possibility to automate processes that previously required manual labour.

Numerous cases can be found for the use of computer vision in everyday life, industrial applications and chemical processes, and the scope will most likely widen in the coming years. Computer vision can be applied to the determination of the flow parameters in Taylor flow, which is the most common flow regime in small-channel gas-liquid two-phase flow systems. The automatic processing of the phase-boundaries enables the determination of the length of the gas bubbles, and the length of the liquid slugs as well. These lengths are important parameters in predicting the pressure drop, heat and mass transfer[2], and measurement of the volume of the bubbles passing through (from which the flow-rate can be derived) also becomes possible. These parameters can be used beneficially during catalytic hydrogenation in flow systems, in heat transfer processes, and in other chemical reaction studies as well. The author's aim was to develop an application that can be used advantageously, to determine the volume of gas passing through small-channel two-phase flow systems, having the flow regime of Taylor flow.

In this work, the considerations regarding the development of the application (written in C++ with OpenCV) and its measurement system are discussed. In evaluating the performance of the application, both the accuracy of the volume measurement and the criterion of real-time processing have been taken into consideration. According to the results, the developed application can replace the manual gas measurement method in the specified environment.

[2] R. Gupta, D. F. Fletcher, and B. S. Haynes, "Taylor Flow in Microchannels: A Review of Experimental and Computational Work," *J. Comput. Multiph. Flows*, vol. 2, no. 1, pp. 1–31, 2010.

1 BEVEZETÉS

A számítástechnika fejlődésének köszönhetően egyre több művelet válik automatizálhatóvá, ami nemcsak a termelékenység (legyen szó fizikai vagy szellemi termékről), hanem a hatékonyság és a biztonság növekedését is elősegíti. Ezen okok, valamint a manuális műveletvégzés hátrányai miatt, melyek közé a költségek, a pontosság, a biztonság, valamint a higiénia is sorolható, egyes műveletek automatizálásának megoldása kiemelt érdekeltségű lehet.

A számítási kapacitás növekedése, valamint a képkészítés és feldolgozás eszközeinek fejlődése olyan új lehetőségeket tártak fel, melyek korábban csupán a kézi munkaerő segítségével voltak kivitelezhetőek. Ezen lehetőségek – bár eltérő mértékben – a hétköznapokban, az iparban, valamint a kutatások során is kihasználásra kerültek, és a jövőben bizonyára a gépi látórendszereknek még számos új felhasználási formája fog megjelenni.

1.1 Számítógépes látás

A számítógépes látás egy gyorsan fejlődő tudományterület, mely képek elemzésével, változtatásával és magas szintű megértésével foglalkozik [1]. Célja, hogy meghatározza mi is történik a kamera előtt és ezzel számítógépes- vagy robotrendszereket irányítson, valamint, hogy a kamera eredeti képeinél esztétikusabb és információgazdagabb képekkel szolgáljon [1]. Felhasználásának spektruma igen széles: megfigyelőrendszerekben, autóiparban, fényképészetben, filmgyártásban, webes keresésben, gyógyszeriparban, kiterjesztett valóságban, felhasználói interfészekben, és számos egyéb – beleértve ipari – területen alkalmazzák [1].

A mai kamerák képesek maguktól a célra fókuszálni, felismerni a pislogó embereket a képen, továbbá például egy mosoly felismerésekor automatikusan elkészíteni a felvételt. A szövegfelismerő rendszerek képesek lefotózott és szkennelt dokumentumok szövegét felismerni, mely lehetővé teszi a bennük lévő keresést, idegen nyelvekre lefordítását, illetve gépi hanggal felolvastatását [1]. A jövőben a vezetést segítő rendszerek nagy szerepet játszhatnak a parkolás segítésétől egészen a balesetek megakadályozásáig [2]. Az intelligens kamerás megfigyelőrendszerek egyre fontosabb szerephez juthatnak közterületek biztonságának a megőrzésében.

Széles felhasználhatósági körük mellett, a számítógépes látáshoz tartozó algoritmusok számításigénye nagy. Még a rendkívül specifikus problémákat megoldó algoritmusok, mint amilyen a panorámakép összeillesztése, vagy az arc- és mosolyfelismerés is nagy számítási kapacitást igényelnek. Ezen felül számos műveletet valós időben kell elvégezni, vagyis egy képkocka feldolgozására csupán 20-40 ms jut. Ez a feltétel nagy kihívás elé állítja a mobil és beágyazott architektúrákat. Ugyan a minőség és gyorsaság optimális egyensúlyának megtalálása, valamint az adott architektúrához való optimalizálás segít, a megoldás mégis az erősebb feldolgozóegységek és architektúrák megjelenésében rejlik, mely a félvezetőipar eddigi szüntelen fejlődésének köszönhető.

Ez a fejlődés lehetővé tette a digitális kamerák széleskörű elterjedését, melyet a hordozható eszközökön keresztül mind tapasztalunk, hiszen a CMOS érzékelők gyors, energiatakarékos és költséghatékony alternatívát nyújtottak a CCD alapú érzékelőkkel szemben. Az eddig csupán laboratóriumi és ipari lehetőségek mellett ma már bárki számára elérhető közelségbe kerültek a különféle számítógépes látást felhasználó alkalmazásokat is kiszolgálható rendszerek, amelyek elősegítik ezen alkalmazások iránti igény kialakulását, és a már meglévő alkalmazások térhódítását. Ez a széleskörű hozzáférhetőség az, ami igazán izgalmassá teszi a gépi látáson alapuló alkalmazások jövőjét.

1.1.1 Számítógépes látás a hétköznapokban

Hétköznapi felhasználást illetően a különböző képmanipulációs technikák a legkézenfekvőbb alkalmazásai a számítógépes látásnak. Ezek közé tartozik felvételek készítésekor a digitális stabilizáció, a panorámakép készítése, a különböző szűrők vagy HDR (High Dynamic Range) technikák alkalmazása, melyek mind az esztétikai érték növelését szolgálják. Az internetes videótartalmak készítőinél is teret nyertek a speciális hatások és utómunkálatok használata, mint amilyen a bluebox illetve greenbox technika is, ahol a színes háttér előtt felvett főesemény felvételét összemontírozzák a háttérnek szánt felvétellel, szabad utat engedve az alkotói kreativitásnak, melyet korábban csak speciális célhardverekkel lehetett megvalósítani.

A pislogás-, mosoly- és arcfelismerő funkciók szintén megtalálták helyüket a mindennapokban a fényképkészítő alkalmazásokba integrálva, melyek az automatikus fókuszálást és képkészítést is elősegítik. Az arcfelismeréssel továbbá az egyes videós

csevegő alkalmazások kapcsán, a társalgó felek arcaira maszkot illesztve, is találkozhatunk.

Mindemellett (ugyan ma még nem széleskörűen) egyre inkább elterjedőben vannak a különféle vezetést támogató rendszerek [2], a kiterjesztett valóságot megvalósító alkalmazások, valamint a virtuális valóságot támogató felhasználások is. Ezek a jövőben akár olyan mindennapossá válhatnak, mint ma az ABS vagy a mobiltelefonok.

1.1.2 Gépi látás az iparban

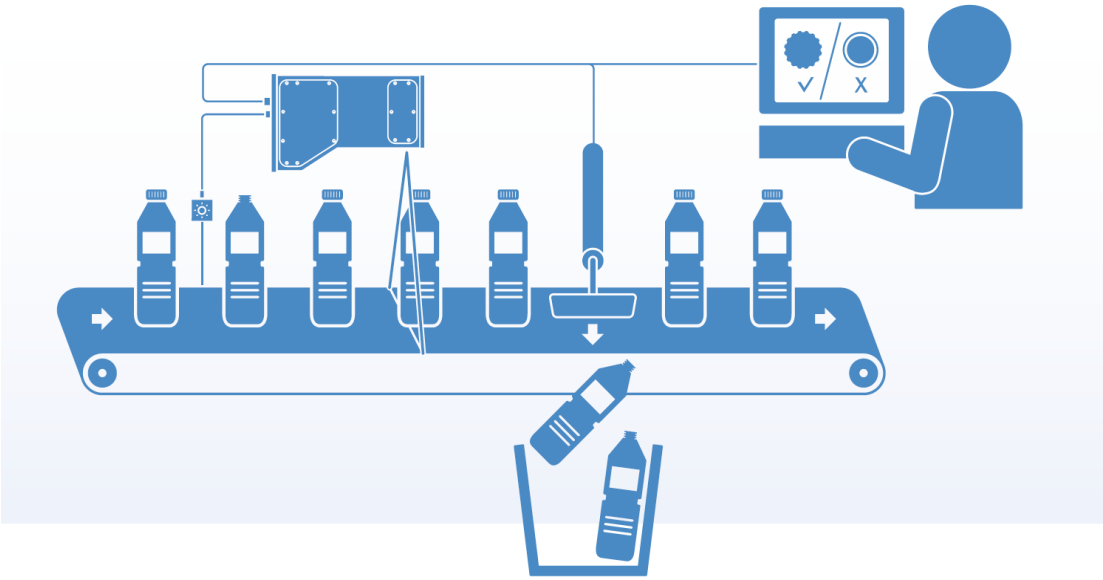
A gépi látás használata igen sokrétű az iparban, mely precizitásának, monotonitás iránti semlegességének és a munkatér tisztaságának megőrzésének köszönhető, valamint annak, hogy a fejlett látórendszereknél implementált kivezetéseknek köszönhetően, közel bármely környezetbe könnyedén integrálható. Fő feladatai közé ábrák és tárgyak azonosítása, pozíciójának meghatározása, valamint külső tulajdonságainak elemzése tartozik, melyek a továbbiakban – a teljesség igénye nélkül – konkrét ipari felhasználásokon keresztül [3], [4] kerülnek bemutatásra.

Az autóiparban a gépi látással a gyártósori minőségellenőrzéskor, valamint alkatrészek beazonosításakor is találkozhatunk. Az első kategóriába tartozik többek között a fékbetétek ellenőrzése, ahol a felület egyenletességét, a csapszegek magasságát, valamint a rugók szintjeit is vizsgálni kell. Utóbbi kategóriába tartozik például a motorblokkon elhelyezkedő adatmátrix beolvasása is, mely garantálja, hogy a blokk a megfelelő karosszériához és felfüggesztéshez kerüljön. A címkék és adatmátrixok beolvasása az autóiparon kívül is használatos az alkatrészek beazonosítására és nyomonkövetésére.

Az elektronikai iparban a gépi látásnak a NYÁK beazonosításon felül, azok minőségellenőrzése során is fontos szerep jut, méghozzá a zárlatok és forrasztások vizsgálatával, az alkatrészek rossz pozícionálásának, valamint azok hiányának ellenőrzésével. A napelemcellák magas fokú automatizált gyártásánál, melyet a munkatér tisztasága és a kezelt anyagok sérülékenysége indokol, a gépi látás fő feladatköre a (wafer) pozíciójának meghatározása a mozgatáshoz, valamint azok sérüléseinek detektálása a veszteségek minimalizálásához.

Az élelmiszeriparban a gépi látáson alapuló megoldásokkal lehetőség nyílik a termékek alakjának, vastagságának, térfogatának, felszínének, valamint a színének az

ellenőrzésére, melyek mind-mind segítséget nyújthatnak a selejt kiválogatásában [5], [6]. Péksüteményeknél például selejtnek tekinthető az áru, ha a feltét mennyisége (például a szezámmagok száma) vagy az alak nem megfelelő, amelyikben idegen tárgy detektálható, valamint ha még nyers állapotú. Palackozásuk során, a különböző folyadékot tartalmazó tartályok lezártságának ellenőrzése is kritikus fontosságú, hiszen a szivárgás nem csak gyártósori, hanem keresztfertőzési problémákat is okozhat. Egy ilyen rendszert szemléltet a 1. ábra [3].



1. ábra

Gépi látás egy tipikus felhasználása a minőségellenőrzésben.

1.1.3 Gépi látás a kémiában

A számítógépes látás használatára (a korábbiakban említett hétköznapi és ipari felhasználási módokon felül) számos kémiai alapokon nyugvó példát lehet hozni. A példák között szerepelnek a különböző indikátorok színének elemzése, mellyel lehetőség nyílik pH-érték megállapítására [7]–[10], a koleszterinszint mérésére [11], a mérgező gázok detektálására [12], az emberi nyálban lévő kortizol mérésére [13], valamint még halak frissességének meghatározására is [14]. Egy másik felhasználás során a számítógépes látórendszer integrálásával egy áramlásos szintézist megvalósító rendszer felépítésének a költségén lehetett érdemben csökkenteni [15]. Capitán-Vallvey és munkatársai [16] pedig a számítógépes látáson alapuló analitikai kémiai eljárásokról és rendszerekről készítettek összefoglalót. A felhasználási módok sokszínűsége jól mutatja a gépi látás használatának potenciálját a kémia területén is, mellyel műveletek

egyszerűsödnek, biztonságosabbá válnak, valamint szélesebb rétegeknek válnak elérhetővé.

Fontos itt azt is megemlíteni, hogy az informatikai újdonságok csupán bizonyos késéssel tudnak csak megjelenni a kémia területén, hiszen interdiszciplináris mivolta révén a fejlesztésekhez speciális tudású szakemberekre vagy iparágak közötti kollaborációra van szükség. Ennek ellenére – és amellett, hogy az informatika még számos újítást hozhat a jövőben – a vegyészet sok informatikai támogatást használ, melyre egy jó példa az áramlásos kémia.

1.2 Áramlásos kémia

Az áramlásos kémia az elmúlt években jelent meg olyan technológiaként, mely magas fokú biztonság mellett tesz lehetővé olyan reakciókat, melyek veszélyes vagy robbanékony anyagokat tartalmaznak, olyan folyamatokat, melyek magas hőmérsékleten vagy nyomáson mennek végbe, valamint olyan gyors reakciókat, melyek rövid életű reakció intermediereket tartalmaznak [17]. Alapelve az, hogy a különböző csövekben – a pumpák által – mozgatott folyadékok a csövek találkozásainál érintkeznek egymással, és így reagálhatnak is.

Az áramlásos reakciók sokkal könnyebben automatizálhatóak, mint azok a reakciók, melyek során egyszerre nagy tömeget kívánnak reagáltatni. Különböző mérőegységek felhelyezésével olyan magas fokú automatizálás is kiépíthető, mely során a rendszer, akár emberi közbeavatkozás nélkül is, képes a reakció lehetséges paramétereinek egy széles skáláján vizsgálódni az optimum megtalálásáért [18].

1.2.1 Kiscsatornás Taylor-áramlás

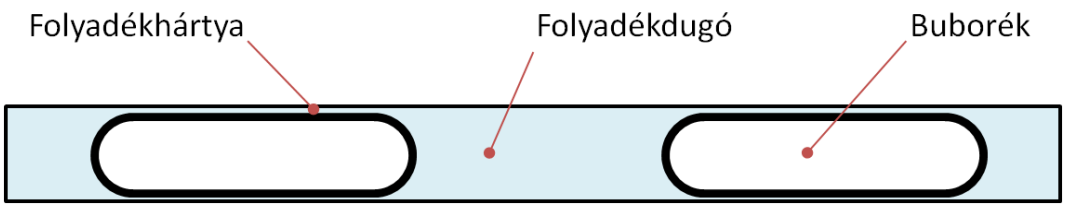
Az elmúlt évtizedekben fontos területté vált a kiscsatornás kétfázisú áramlási rendszerek kutatása és ipari alkalmazása, melyek vegyi reaktorok, hőcserélők, hűtőfolyamatok és mikro-párologtatók formájában is előfordulnak [19]–[23]. Előnyeik, mint a kis dimenziójú emelt hő- és anyagtranszfer, a hatalmas felület-térfogat arány, már gázok, folyadékok, és többfázisú rendszerek esetén is ki lett mutatva [20], [24]–[26].

Egy rendszer általánosságban akkor számít kiscsatornásnak, mikor a felületi feszültséghez képest a gravitációs erők elhanyagolhatóak [27]. Ennek számszerűsítése

az Eötvös számmal (vagy Bond számmal) lehetséges, mely a gravitációs erők fontosságát mutatja a felületi feszültség erőihez képest. Arra, hogy ennek mely értéke alatt számít kiscsatornásnak a rendszer, különböző kutatók más-más értéket javasoltak [27].

A kiscsatornás felhasználások karakterisztikáinak tanulmányozásához elengedhetetlen az áramlási tulajdonságok mérése, melyekhez az áramlási forma, a nyomás, a hőmérséklet, valamint a sebesség is tartozik [23]. Ezen tulajdonságok mérése kisméretű csövek esetén nehezebb, mint a hagyományos méretű csöveknél [23], [28], hiszen a felületi feszültségnek köszönhetően még az áramlási formák is különböznek [29]. Ezen okok miatt kritikus fontosságú tudni, hogy mely mérési technikák és hogyan alkalmazhatóak ilyen esetekben [23].

A kiscsatornás kétfázisú áramlási-rendszereknél a Taylor-áramlás [27]–[29] az egyik leggyakoribb áramlási forma, mely a csatornát szinte teljesen kitöltő, megnyúlt, egymástól folyadékkal elválasztott buborékokból áll. A buboréktól mentes folyadékdugókat (liquid slug, valamint liquid plug) a buborék és az üvegcső fala közötti vékony folyadékhártya köti össze, ezt a 2. ábra szemléleti. Taylor-áramlást egyre több ipari folyamat során alkalmaznak különleges hidrodinamikai tulajdonságai miatt [28]. Használatával szuperszámítógépek moduljainak, nagy teljesítményű röntgengépeknek és egyéb diagnosztikai berendezéseknek a hűtésekor, katalitikus és többfázisú reaktoroknál, valamint mikrofiltrálásos rendszerek esetében is találkozhatunk [28].



2. ábra

A Taylor-áramlás grafikus szemléltetése.

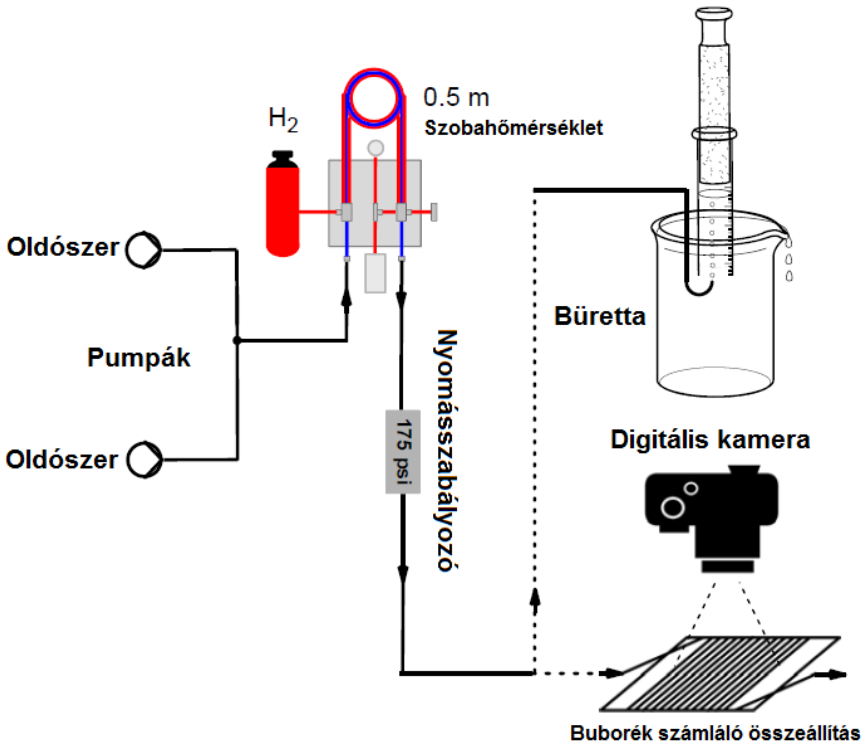
A kiscsatornás Taylor-áramlású rendszerek áramlási tulajdonságainak automatikus kiértékelésében lévő lehetőségek egy közelmúltban publikált kémia alkalmazás [17] példáján keresztül kerülnek bemutatásra. Katalitikus hidrogénezési reakciók kivitelezésére egy angol kutatócsoport egy Teflon® AF-2400 anyagú féligáteresztő membránon alapuló rendszert fejlesztett ki, mely szerves kémiai szintetikus munka során előnyösen alkalmazható katalitikus hidrogénezési reakciók

kivitelezésére. A bemutatott eszköz segítségével hidrogéngáz szerves oldószerben történő elnyeletése, illetve a folyadékból történő eltávolítása valósítható meg.

A katalitikus hidrogénezés egy rendkívül fontos és elterjedt reakció a szerves szintézis során, mely számos gazdaságilag- és társadalmilag fontos folyamatnak az alapja [17]. Felhasználásai között szerepel az élelmiszeriparban a természetes olajok hidrogénezése margarin és egyéb fogyasztható termékek előállítására, valamint az olajiparban a hidrokrakkolás az alacsony szennyezettségű dízel és kerozin előállítására [30]. Számos előnye között szerepel, hogy a hidrogén nem mérgező, olcsó és nagy mennyiségben elérhető. Ezért a reakciósebesség növelésére nagy feleslegben alkalmazzák, a reakció során el nem reagált gáz pedig viszonylag könnyen eltávolítható [17]. Hátrányai közé robbanékony mivolta tartozik, mely a megnövelt nyomás alatt, egyszerre nagy mennyiségű gázt alkalmazó folyamatok veszélyességét nagyban megnöveli. Ez az áramlásos rendszerek használatával ellensúlyozható [17].

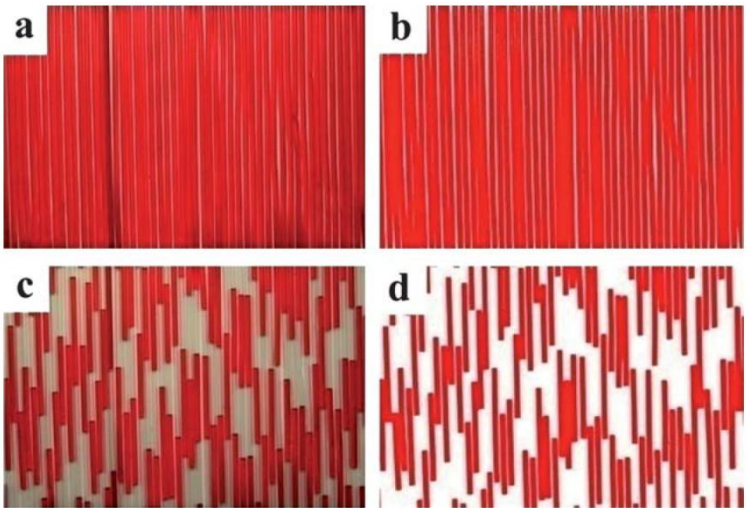
A közleményben bemutatott gázbevezető egységben két koaxiális cső található, melyek közül a belsőben folyékony szerves oldószer áramlik, a külsőbe pedig nagy nyomású hidrogéngázt vezetnek. A félig áteresztő membránból készült belső cső lehetővé teszi a gáz áthatolását, míg a folyadékét nem, így a hidrogén az oldatba jut, és oldódását követően részt vesz a kívánt kémiai reakcióban. (A gáz folyadékból való eltávolítása a külső cső vákuum vagy alacsony nyomás alá helyezésével lehetséges.) A reaktort elhagyva, az oldat továbbhalad egy nyomásszabályzóig, ami biztosítja a megfelelő nyomásérték fenntartását, megelőzve a gázbuborékok kialakulását. A szabályzó utáni nyomásesés következtében a reakcióban fel nem használódott gáz buborékok formájában megjelenik a csőben.

A gáz mennyiségi meghatározása a kísérletek elején még hagyományos gáz-bürettás módszerrel folyt (melynek ismertetését lásd 2.1.5 fejezetben), ám egy képfeldolgozó módszer segítségével ezt tovább egyszerűsítették. A képfeldolgozó technika alapelve, hogy a nyomásszabályzó utáni csőszakaszról, azt egy négyszögletes keretre feltekercselve, felvételeket készítenek egy digitális kamera segítségével. Ezt követően a felvételekből bináris képet állatínak elő. A kalibrációs fotó alapján a későbbi felvételek logikai „1” értékű (képeken piros) pixeleinek száma alapján következtetni lehet a kioldódott hidrogén és a folyadék arányára. A 3. ábra a teljes összeállítást, míg a 4. ábra a képfeldolgozás lépéseit mutatja.



3. ábra

Cső-a-csőben gázreaktor tesztelésre létrehozott mérési elrendezés [17]. A reagens bevezetése nem szerepel az ábrán.



4. ábra

Nyers felvétel csak folyadékot (a), valamint hidrogént is tartalmazó folyadékáramról (c), illetve ezek előfeldolgozott változatai (rendre b és d). [17]

Mivel a kamera, a pumparendszer, valamint a nyomásszabályzó is számítógép vezérlés alá helyezhető, a mérés teljesen automatizálható. Egy ilyen buborékszámláló alkalmazás elősegítheti a gázbevezető rendszer hatékonyságának és az egyensúlyi

gázoldódási adatoknak a mérését az anyagok széles palettáján, miközben számos jelenleg elérhető módszernél egyszerűbben kivitelezhető és gyorsabb megoldást biztosít [31]–[34].

Az alkalmazott módszernek hátránya viszont a szín alapú megkülönböztetés, a méréshez szükséges csőszakasz nagy hossza, valamint, hogy a gáz kvantitatív értékéhez csak a folyadék térfogatáramának ismeretében juthatunk. Egy ilyen hibákat orvosló alkalmazás kifejlesztésével a cikkben említett felhasználáson kívül lehetővé válna folyamatok gázfelhasználásának a mérése a folyamat előtti és utáni gáz mennyiségének meghatározásával, valamint zárt rendszerek szivárgása esetén a bekerülő gáz detektálása és mérése. Egy videós rendszerrel továbbá lehetőség nyílik a buborékok és folyadékdugók hosszának meghatározására is, mely fontos paraméter a Taylor-áramlásnál lévő nyomásesés, a hőátadás és tömegtranszfer megjósolásában is [28], [29]. A hosszak meghatározására számos összefüggést javasoltak már, ám ezek főleg tapasztalati jellegűek, és csak meghatározott bemeneti geometria esetén alkalmazhatóak [28].

Dolgozatom során egy számítógépes látás alapú térfogatmérő alkalmazás kifejlesztésének a folyamatát tárgyalom, melynek jóságára mérések alapján becslést teszek. Egy ilyen, gépi látás alapú rendszer további előnye, hogy a valós idejű kvantitatív mérésre a vizsgált rendszer megbontása nélkül is lehetőséget nyújt. Megjegyzendő, hogy ugyan az alkalmazás videofelvételek segítségével készült, (az elérési időt leszámítva) közömbös az alkalmazás számára, hogy videófelvételek, vagy valós idejű kameraképek szolgáltatják a képkockákat.

2 AZ ALKALMAZÁS ELKÉSZÍTÉSE

Az alkalmazás elkészítése többlépcsős folyamat eredménye volt, melyben a mérési összeállítás és a program algoritmusa együtt fejlődött. A kezdetleges összeállításoknál készített videók kiértékelésekor azok hibái felszínre kerültek, és így irányt mutattak a későbbi összeállításokkal szemben támasztott követelményekre. Az egyre jobb minőségű videóknak köszönhetően az alkalmazás különböző lépéseinél használt technikák tesztelésre kerültek, hogy a lehetséges módszerek széles palettájából a legmegfelelőbb kerüljön kiválasztásra. A könnyebb nyomon követhetőség érdekében a mérési elrendezés és az algoritmus fejlődése külön fejezetekben kerülnek kifejtésre.

2.1 A mérési elrendezés

Ahhoz, hogy a feldolgozó algoritmust fejleszteni és tesztelni lehessen, szükség van egy olyan mérési összeállításra, mely lehetővé teszi a felvételek konzisztens elkészítését és a referenciaértékek feljegyzését. A konzisztens elkészítés alatt értendő, hogy napszaktól, időjárástól és egyéb külső hatásoktól függetlenül a videók között ne lehessen lényegi különbséget tenni, így a feldolgozó algoritmusnak elég csupán az alap feladattal megbirkóznia, nem kell a körülmények változását is lekezelnie. A referenciaértékek mérése a kalibrálás és a módszer jóságának meghatározása során is szükséges, melyek elengedhetetlenek egy új módszer fejlesztésekor. A későbbi reprodukálhatóság szintén kritikus a módszer gyakorlati alkalmazhatóságának szempontjából.

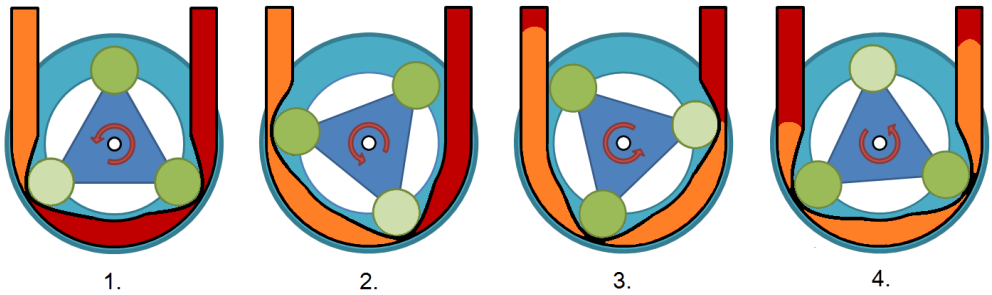
A végső mérési elrendezés kialakításához számos átmeneti elrendezésen át vezetett az út, hiszen mindegyik mérési elrendezés más-más problémára világított rá. A következőkben nem az egyes átmeneti mérési összeállítások, hanem az általuk felismert és megoldott problémák, valamint a mérések során felhasznált módszerek egyfajta összefoglalója kerül tárgyalásra, majd ezek után kerül a végső mérési összeállítás bemutatásra.

2.1.1 Áramoltatás

Egy áramlásos rendszer teszteléséhez elengedhetetlen a rendszerben lévő folyadéknak és gázoknak az áramoltatása, valamint – kivételes eseteketől eltekintve –

azok rendszerbe töltése. Az első mérési elrendezés során hamar fény derült arra, hogy a manuális keringetés, mely fecskendő használatával történt, nem felel meg az elvárásoknak, mivel az egyenletes áramoltatás, valamint az azonos áramlási sebességek biztosítása nehézkes. Ezen okok miatt a keringetés (és betáplálás) feladatát pumpák végzik.

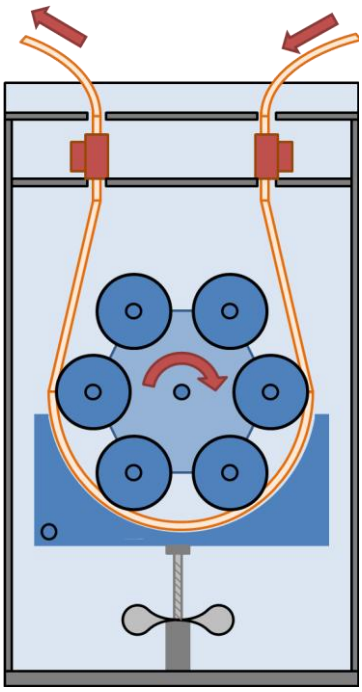
A különböző pumpafajták közül a perisztaltikus pumpákra esett a választás. A közkedvelten használt pumpa előnyei, hogy karbantartási költségei alacsonyak, iszapos, nyúlós és viszkózus anyagok esetén is használható, valamint szelepek nélkül is megakadályozza a visszafolyást. További előnye, hogy az áramoltatott anyag csupán egy csővel érintkezik, így tisztítása könnyű. Hátrányai közt szerepel a kis forgássebességek melletti pulzálás. Működése – melyet a 5. ábra is mutat – azon alapszik, hogy a tömlőn görgőket gördítve azok összenyomják maguk alatt a csőszakaszt és haladásuk során „maguk előtt tolják” a tömlőben lévő anyagot.



5. ábra

A perisztaltikus pumpa működésének szemléltetése.

A felvételek készítésekor használt pumpa vázlatát mutatja a 6. ábra. Az optimális működéshez fontos a cső feszesen tartása, mely a csövön lévő (ábrán vörös) felfogatók különböző szinten lévő akasztókba helyezésével érhető el. A tömlők összenyomódásának a mértéke az (ábrán kék) U alakú ellentámasz állításával változtatható. Az áramlási sebességet és annak irányát, a görgőket mozgató villanymotor vezérlésével lehet szabályozni. A mérési összeállítások során használt pumpa esetén csupán az áramoltatási irány megválasztása volt lehetséges, viszont térfogatárama – összhangban azzal, hogy egy laboratóriumi eszközről van szó – megfelelt a forrásoknál használt nagyságrendekkel [10], [17], [23], [29], pumpánként 1,2 mL/perc volt. Ez a fázisonkénti térfogatáram alkalmas volt a kívánt Taylor-áramlás előidézésére.



6. ábra

A használt perisztaltikus pumpa felépítése.

2.1.2 Csőválasztás

Ahhoz, hogy megfelelő minőségű felvételek készülhessenek a vizsgált csőszakasznak megfelelő optikai és mechanikai tulajdonságokkal kell rendelkeznie. Előbbi tulajdonság alatt azt kell érteni, hogy a fázisoknak vizuálisan is jól kivehetőnek kell lenniük, utóbbihoz pedig azt, hogy az áramlási sebességtől és az anyagsűrűségtől függetlenül a csőnek tilos kilengenie, deformálódnia.

Ezeknek a feltételeknek az első próbálkozás során használt infúziós cső nem felelt meg, mivel kilengett a folyadék sebességének változásakor. Rövid megfontolás után vegyészeti alkalmazásokra is alkalmas, hőálló üvegcsövekre esett a választás. A különböző belső- és külső csőátmérővel rendelkező üvegcsövek használatával a méretbeli különbségek okozta hatások is vizsgálhatóvá váltak. Érdemes itt említést tenni arról, hogy a vizsgált csövek belső átmérője rendre 2,8 mm, 3,95 mm, 4,8 mm és 8 mm volt, melyek egyes források alapján már nem tartoznak a mikrocsatornás nagyságba [29], ám más források alapján odatartoznak [23], így a biztonság kedvéért a későbbiekben ezek a kiscsatornás jelzővel lesznek hivatkozva.

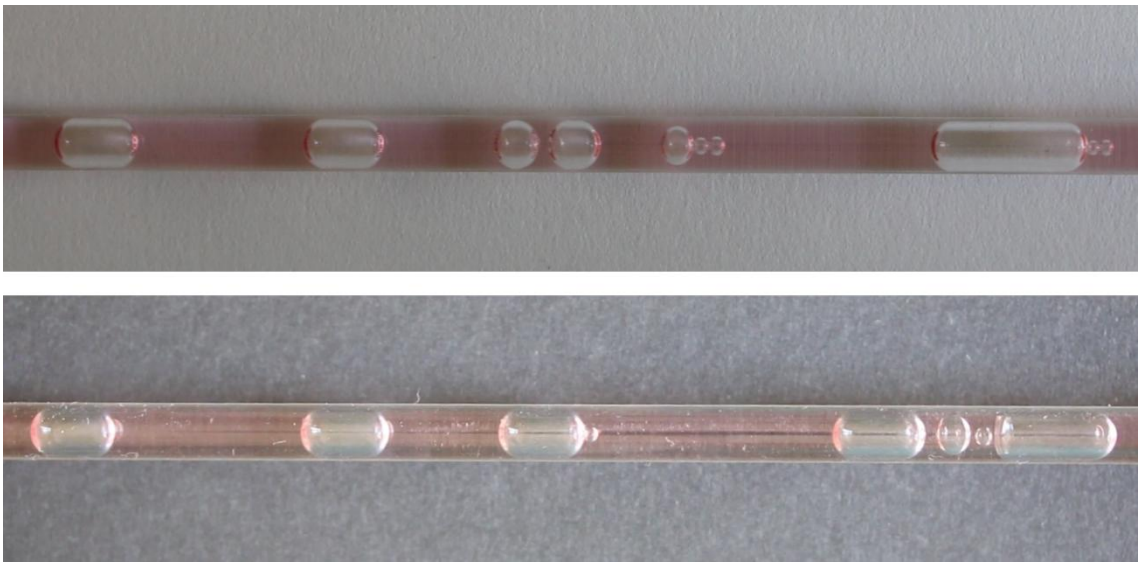
A különböző átmérők vizsgálatakor világossá vált, hogy a 8 mm belső átmérővel rendelkező cső túl nagy a kívánt áramlási forma eléréséhez. A Taylor-áramlás helyett a

buborékok vízszintesen felfeküdtek a cső felső felére, és vízmértékként viselkednek. Ezen ok miatt ezzel a csővel nem készültek videófelvételek.

A csövek további vizsgálata alapján a végső mérési elrendezésben a 3,95 mm-es belső átmérőjű cső került alkalmazásra. Ennek egyik oka, hogy a 3,95 mm-es cső a 2,8 mm-es csőnél jobb láthatósági viszonyokat nyújtott a buborékok körvonalát illetően (ám nem annyira jót, mint a 4,8 mm-es csőnél). Másik oka pedig az, hogy a buborékok sokkal inkább henger-szimmetrikusak voltak, mint a 4,8 mm-es csőnél (viszont nem annyira, mint a 2,8 mm-es csőnél). Utóbbi szempont fontossága a 2.3.4 fejezet során kerül kifejtésre.

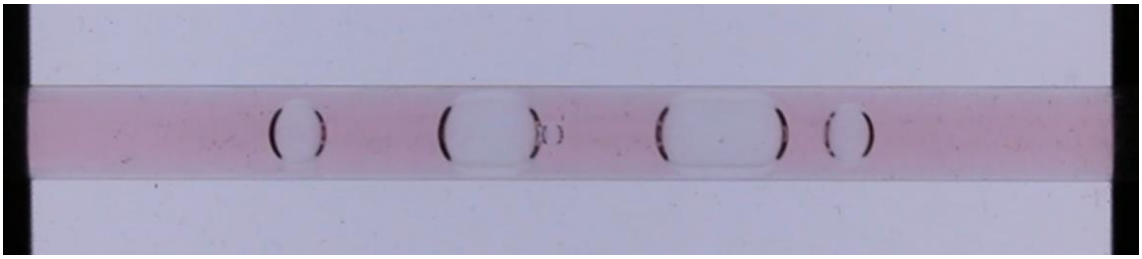
2.1.3 Fényviszonyok

A kezdeti rendszerek összeállítása után a felvételek készítésekor hamar fény derült arra, hogy a megvilágítás kulcsfontosságú a konzisztens felvételek készítéséhez. A csupán természetes fényre való támaszkodás elkerülendő egy robusztusabb alkalmazás készítésekor, így a kezdetektől olyan megoldásra volt szükség, ami az árnyékokat, tükröződéseket és egyéb zavarokat nagy biztonsággal képes elhárítani. Erre az iparban gyakori módszer az objektív körülötti LED gyűrű, illetve a passzív megvilágítás. Ezen lehetőségek hiányában más módszert kellett alkalmazni, mégpedig egy, a csövet alulról megvilágító fényforrást, mely egyenletes fényével kiiktatja az árnyékokat és a környezeti zavarokat, miközben rendkívüli részletességet biztosít a kamera számára. E megoldás az előtte készült, különböző színű és mintázatú hátterekkel készített felvételeknél nagyságrenddel jobb láthatóságot biztosított, még színtelen folyadékok esetén is. A háttérvilágítás okozta javulást a 7. ábra és 8. ábra összevetésével lehet szemügyre venni ugyanazon folyadék áramoltatásánál.



7. ábra

Különböző hátterek tesztelése során készített természetes fényű felvételek.



8. ábra

A megoldást jelentő háttérvilágítás tesztelése, mely a fényviszonyok okozta zavarokat kiiktatja.

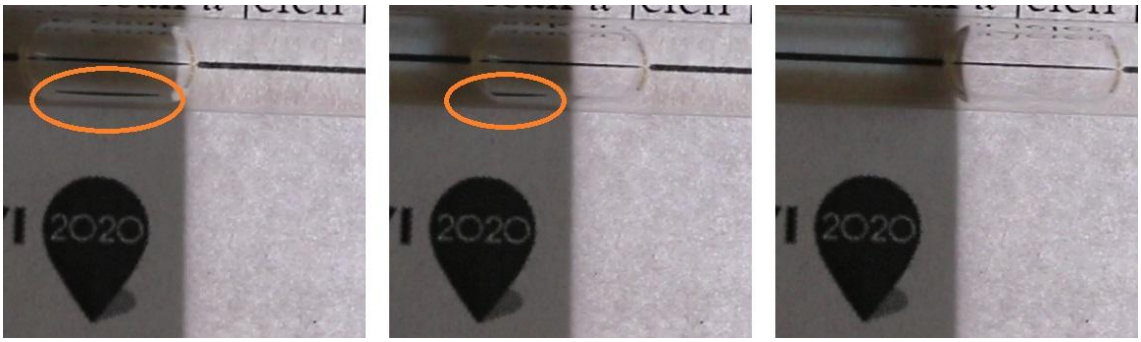
2.1.4 Buborékok láthatósága

A különböző mérési összeállítások elemzésénél arra a megállapításra lehetett jutni, hogy a gázbuborékok szélei eltérő mértékben kivehetőek az egyes felvételeken, függetlenül a folyadék színétől. A jelenség szemléltetésére remek példa a 9. ábra, melyen jól látható, hogy a buborékok csővel párhuzamos oldalai eltérő mértékben sötétednek be. Azon esetekben, ahol a szélek sötétebbek, a buborék sokkal könnyebben beazonosítható, hiszen sokkal nagyobb a környezetéhez képest mért kontrasztja, ami előnyösen felhasználható a mérési alkalmazás fejlesztésénél.

9. ábra

A buborékok széleinek eltérő elsötétülése.

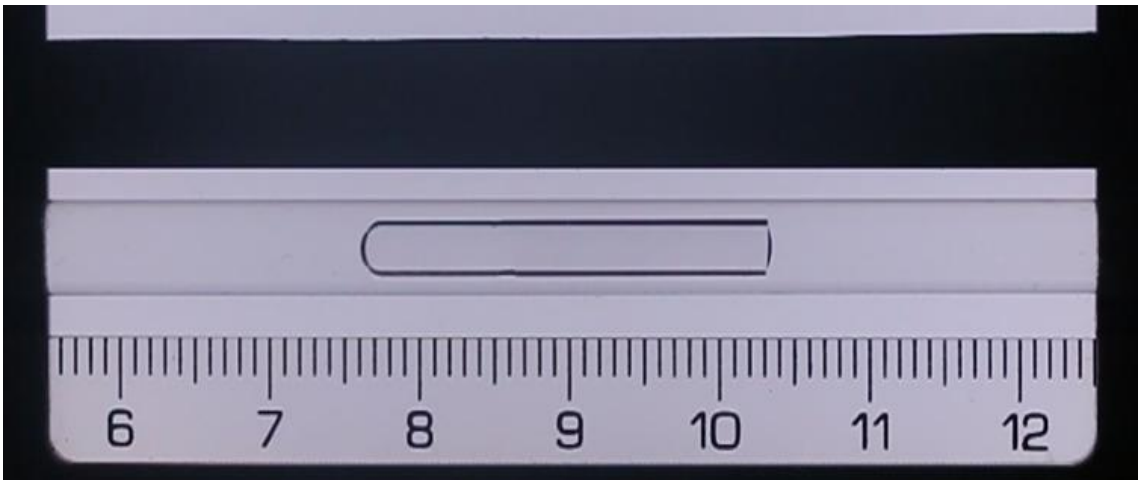
A jelenség okára egy másik elképzelés vizsgálatakor derült fény. Ennek lényege az lett volna, hogy a víz és a levegő különböző törésmutatója miatt a víz mögötti tárgyak nagyobbnak tűnnek. Ezt kihasználva, például egy fekete vonalat alkalmazva, a vonal vastagsága alapján következtetni lehetne a buborékok pozíciójára, hosszára, valamint a csőátmérő ismeretében – bizonyos feltételezésekkel – a térfogatukra. A módszer tesztvideóján a vonal szerepét egy nyomtatott szöveges dokumentum fekete szegélye töltötte be, és a teszt videó igazolta az elmélet helyességét. A felvételeket tovább vizsgálva viszont észrevehető, hogy a csőtől távolabbi karakterek és ábrák fel-feltűnnek a buborékok belső széleinél, az egyik alakzat pedig konkrétan elsötétíti a felette elhaladó buborék szélét (10. ábra narancssárgával bekarikázott része).



10. ábra

A buborék széle az ábra felett való elhaladáskor elsötétül, ahogy a buborék felett látható betűk is felfedezhetők a buborék felső peremén.

A felismert hatást a mérési elrendezésben alkalmazva a buborékok teljes kerületét be lehetett sötétíteni, ami a detektálást nagyban megkönnyíti, ezzel elősegítve a valós idejű feldolgozást is. A 11. ábra jól szemlélteti, hogy egy fekete kartonpapírcsík, a referenciaként használt vonalzó, valamint a háttérvilágítást szolgáltató berendezés kerete milyen hatást gyakorolnak a gázbuborékok széleire a 2,8 mm-es cső esetén.



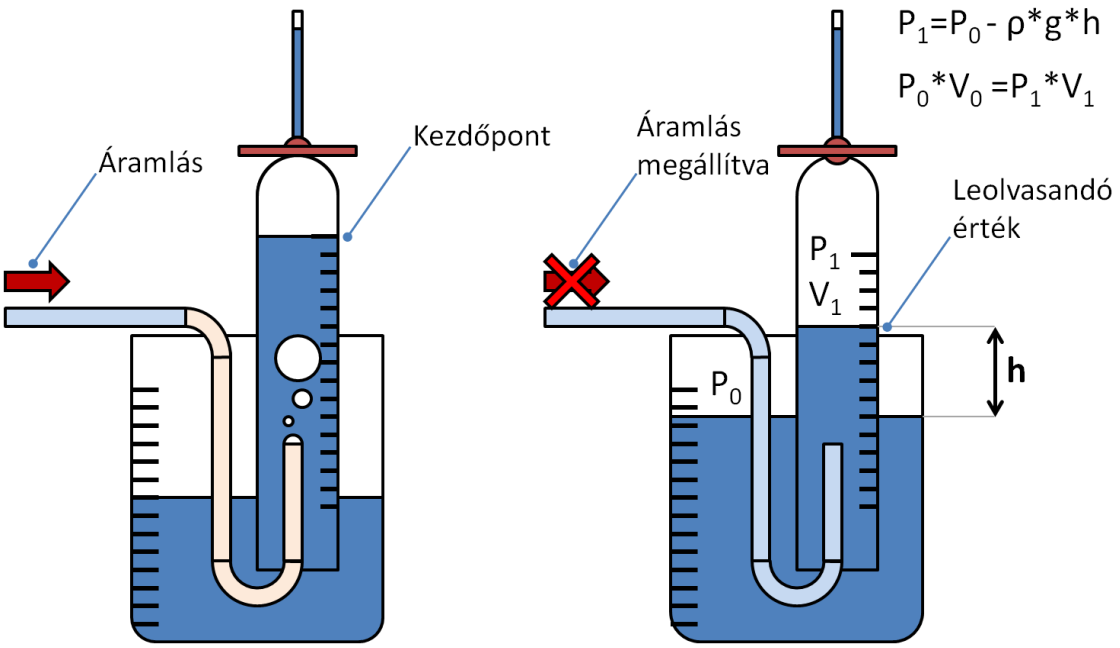
11. ábra

A buborékok külső széleit befeketítő elrendezés tesztelése.

2.1.5 Gázmérés

Ahhoz, hogy egy alkalmazás kalibrálása és jóságának meghatározása megtörténhessen, szükség van referenciaértékekre, mely esetünkben az átáramlott gáz mennyisége. A gázok mérésének egyik módszere a gázbürettás mérés. Ennek lényege, hogy egy folyadékkal teli edénybe egy bürettát fejjel lefelé állítva, a levegő kezdőpontig

való kiszívása után a büretta száján bevezetett csőből kiáramló gáz megreked a büretta tetején. Az osztások alapján a bürettába vezetett gáz térfogata meghatározható. A módszert a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra

A bürettás gázmérés folyamata és az eredményül kapott térfogat légköri nyomáson lévő térfogatra átváltásának alapegyenletei (azonos hőmérsékletnél).

A bürettás mérés esetén a csőből kiáramló gáz légköri nyomáson lévő térfogatának meghatározásához szükség van a vízszintek különbségére, a folyadék sűrűségére és a bürettában lévő gáz térfogatára. Ezek ismeretében az (1), (2) és (3)-as egyenletek segítségével véghezvihető az átváltás, ahol a nullás indexek a légköri nyomáshoz, míg az egyes indexek a bürettás adatokhoz tartoznak. Ha van rá lehetőség, a vízszintek egy magasságba hozásával az átváltás kihagyható, így érdemes ezzel az egyszerűsítéssel élni.

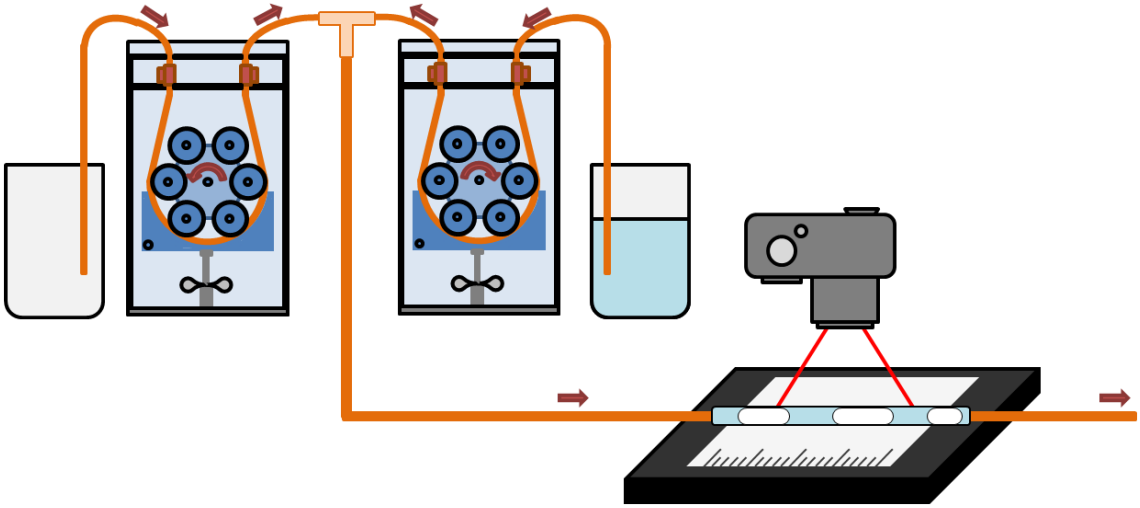
$$P_1 = P_0 - \rho \cdot g \cdot h, \quad \text{ha a büretta vízszintje magasabb mint az edényé} \tag{1}$$

$$P_0 \cdot V_0 = P_1 \cdot V_1, \quad \text{mivel } T_0 = T_1 \tag{2}$$

$$V_O = V_1 \cdot \frac{(P_O - \rho \cdot g \cdot h)}{P_O} \tag{3}$$

2.1.6 Végső mérési összeállítás

Az előző pontokban összefoglalt megfontolások alapján készített végső mérési összeállítást a 13. ábra mutatja. A rendszer lényege, hogy a keringetést és betáplálást végző – egyenként 1,2 mL/perc térfogatáramú – perisztaltikus pumpák csövei egy T-elemnél csatlakoznak, ahonnan az áramoltatott anyagok már egy közös csőszakaszon haladnak tovább, át a vízszintben lévő 3,95 mm-es üvegcsövön, egészen a referencia-térfogat méréséhez szükséges bürettáig.



13. ábra

A végső mérési összeállítás vázlata a büretta nélkül.

A háttérvilágítás, a referenciahosszhoz használt vonalzó és a buborék elsötétítő technika mind az üvegcsöves szakaszon kerültek implementálásra, hiszen a felvételek is erről a szakaszról készültek. Más megoldásokkal ellentétben, melyek hosszú csőszakaszt igényelnek a méréshez [10], [17], a vizsgált csőszakasz hossza itt minimalizálható. A hossz csökkenése nemcsak a módszer integrálhatóságát növeli, hanem előnyt jelent a hosszú csövek okozta nyomáseséssel szemben is. Annak érdekében viszont, hogy minél kevesebb feltételezés kerüljön a rendszerbe (és így ne kelljen eldönteni, hogy egy nagyon hosszú buborék van a rendszerben, vagy a keringés csak egyszerűen megállt), biztosítani kell, hogy a leghosszabb gázbuborék is teljes terjedelmében látható legyen. Ezt a feltételt a felhasznált pumpák mellett 7 cm-es szakasszal – az összes cső esetén – teljesíteni lehetett, így a térfogathoz a gázbuborékok egyenkénti kiértékelésével juthatunk hozzá.

2.2 Felhasznált eszközök

A gépi látást igénybe vevő alkalmazások kifejlesztését nagyban megkönnyíti az erre a célra fejlesztett szoftverek és könyvtárak használata, melyekben az alapvető műveletek és olykor összetettebb funkciók is már implementálásra kerültek. Ilyen, főleg ipari felhasználásra szánt eszközök köré sorolható az MVTec HALCON [35], a Matrox Imaging Library [36], a Common Vision Blox [37], az Adaptive Vision Library [38] és az Adaptive Vision Studio [39], melyek mind segítséget nyújtanak az iparban előforduló feladatok megvalósítására. Használatuk licencdíjhoz kötött, így hozzáférhetőségük korlátozott. Az ingyenesen használható könyvtárak terén közel egyeduralkodó, nyílt forráskódú, gépi látású és gépi tanulású eszközöket tartalmazó könyvtár az OpenCV, melynek arculati elemét a 14. ábra mutatja. A könyvtár 1998-ban egy Intel kutatási projektként indult, de mára már BSD licenc alatt tudományos és kereskedelmi használatra is elérhető [40].

14. ábra

A széleskörűen használt OpenCV szoftverkönyvtár arculati eleme

Az OpenCV több mint 2500 optimalizált algoritmust tartalmaz, melyeket felhasználva lehetőség teremtődik többek között az arcfelismerésre, tárgyak azonosítására, a kamera és tárgyak mozgásának követésére, háromdimenziós modellezésére, több kép összeszövésére, hasonló képek megtalálására egy adatbázisban, valamint a szemmozgás lekövetésére. A könyvtár több mint 47 ezres felhasználói közösséggel, valamint több mint 9 millió becsült letöltéssel rendelkezik. Az olyan cégek mellett, mint a Google, a Yahoo, a Microsoft, az Intel, az IBM, a Honda és a Toyota, rengeteg startup cég is használja a könyvtárat, ahogyan kutatócsoportok és kormányzati szervek is.

Az OpenCV C++, C, Phyton, Java és MATLAB felületekkel is rendelkezik és támogatja a Windows, Linux, Mac OS, iOS és Android platformokat. A számítási hatékonysága által a valós idejű alkalmazásokat célozza meg: az optimalizált C/C++-

nyelv lehetővé teszi a könyvtár számára a többprocesszoros rendszerek nyújtotta lehetőségek kiaknázását, miközben a teljes funkcionalitású CUDA és OpenCL környezetek is aktív fejlesztés alatt állnak.

Az említett előnyök, valamint széles elterjedése miatt az alkalmazás C++ nyelven került kifejlesztésre, melynek kivitelezésére a Microsoft Visual Studio Community 2015, 14.0.254331.01 Update 3-as változata, valamint az OpenCV 3.1-as verziója került felhasználásra.

A készített felvételek 1280*720 pixeles felbontásban, 50 képkocka per másodperces képkockasebességgel kerültek rögzítésre egy Canon EF-S 60mm f/2.8 USM Makró objektívvel szerelt Canon EOS 70D fényképezőgép használatával. A felvételeken vizsgált terület nagysága körülbelül 1180*125 pixeles volt, mely az alkalmazás inicializálási szakaszában került beállításra.

A valós idejű feldolgozás követelménye egy Lenovo W520 típusú számítógépen került tesztelésre, mely Nvidia Quadro 1000M típusú GPU-val, 16 GB DDR3-as RAM-mal, valamint Intel i7-2670QM CPU-val volt felszerelve. A feldolgozási időadatok méréséhez a C++11-ben elérhető chrono header nyújtott segítséget.

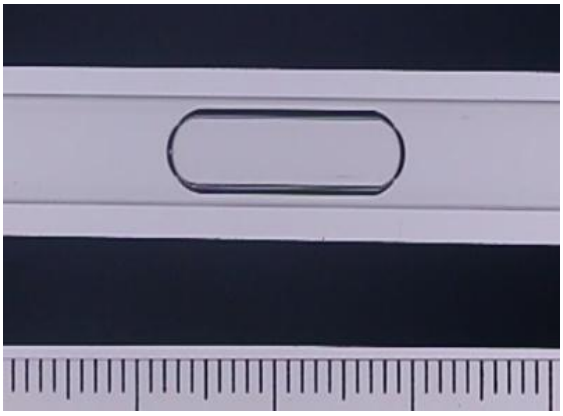
2.3 Algoritmusok

A számítógépes látáson alapuló alkalmazások során a kívánt célt számos úton el lehet érni. Ennek oka, hogy az objektumok detektálására, nyomon követésére, elemzésére, valamint mindezek összehangolására számos megközelítési mód létezik, melyek közül az alkalmazás számára legmegfelelőbbet megtalálni nem egyszerű feladat. A következőkben az alkalmazásban használt algoritmusok kerülnek tárgyalásra, miközben az előnyök és hátrányok összevetésével a végül felhasználásra kerülő módszerek is ismertetésre kerülnek.

2.3.1 Detektálás

Minden gépi látáson alapuló algoritmus kifejlesztésének egyik legmeghatározóbb lépése annak a tulajdonságnak a behatárolása, amely alapján a célpontot a környezetétől meg lehet különböztetni. A detektálásra kétféle megközelítés is létezik. Az egyik esetben a detektálás önálló képeken is működik, nem szükséges feltétlenül az egymás utáni képkockák elemzése. Az ilyen detektálások gyakran az adott tárgy külső optikai

tulajdonságaira építenek [41], [42], mint amilyen a szín és az alak is. A másik megközelítés az egymás utáni képkockák közötti különbségek értelmezésén, vagyis a mozgáson alapszik. E megközelítés alkalmával az előzőnél általánosabban alkalmazható módszer készülhet, viszont kivitelezése további nehézségekbe ütközik. A későbbiekben – a könnyebb összehasonlíthatóság miatt – az egyes technikák eredményei a 15. ábra által mutatott pillanatkép segítségével kerülnek szemléltetésre. A tárgyalt technikákat az 2.1.4 fejezetben ismertetett technika (a buborék elsötétítés) alkalmazása mellett kell érteni.



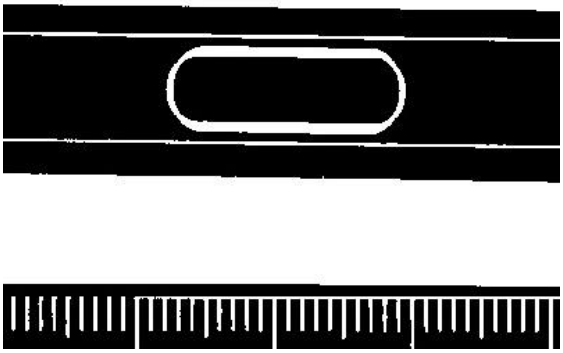
15. ábra

Példának használt pillanatkép.

2.3.1.1 Önálló detektálási módszerek

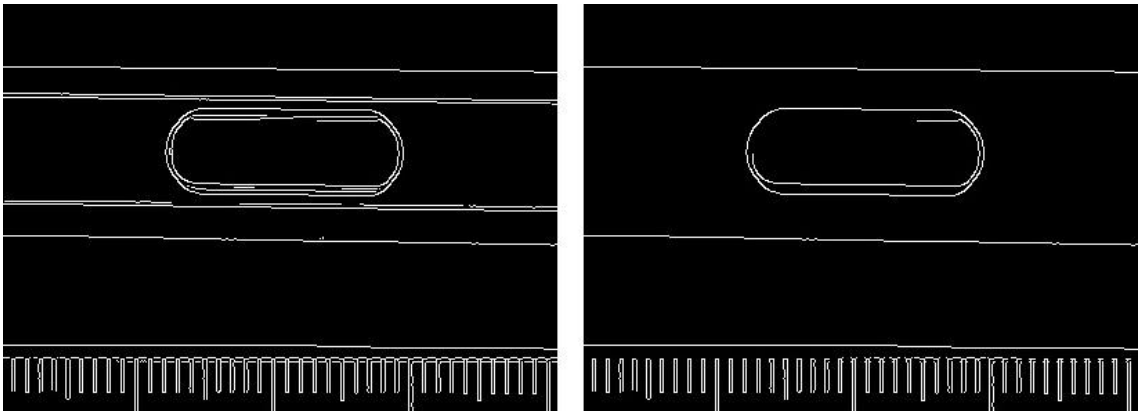
A színalapú érzékelés az egyik legalapvetőbb detektálási technika, melynek számos felhasználási formája van. Mivel a dolgozat során éppen egy színektől függetlenül is működő alkalmazás készítésének a lépései kerülnek tárgyalásra, a színes anyagok detektálásának alapvető nehézségei nem kerülnek említésre. Ezek ellenére viszont nem szabad a szín alapú detektálást kizárni, hiszen a sötét árnyalatokra való szűréssel lehetőség nyílik a gázbuborékok fázishatárainak megállapítására. A HSV színtér S és V csatornáin való küszöbözés eredményét a 16. ábra mutatja.

A buborék szélének sötétítésével létrejövő kontrasztok egy másik lehetőséget is nyújtanak a detektálásra, mégpedig a különböző éldetektáló módszerek formájában. Az éldetektálás széleskörűen alkalmazható közlekedési táblák azonosításától [43] egészen a képen lévő szövegek azonosításáig [44]. Egy ilyen módszernek, a Canny éldetektálásnak [45] az alkalmazását mutatja a 17. ábra.



16. ábra

HSV színtérben való szűrés eredménye, ahol a fehér elemek felelnek meg a feltételnek.



17. ábra

Canny éldetektálás különböző érzékenységi szintekkel való használatának eredménye.

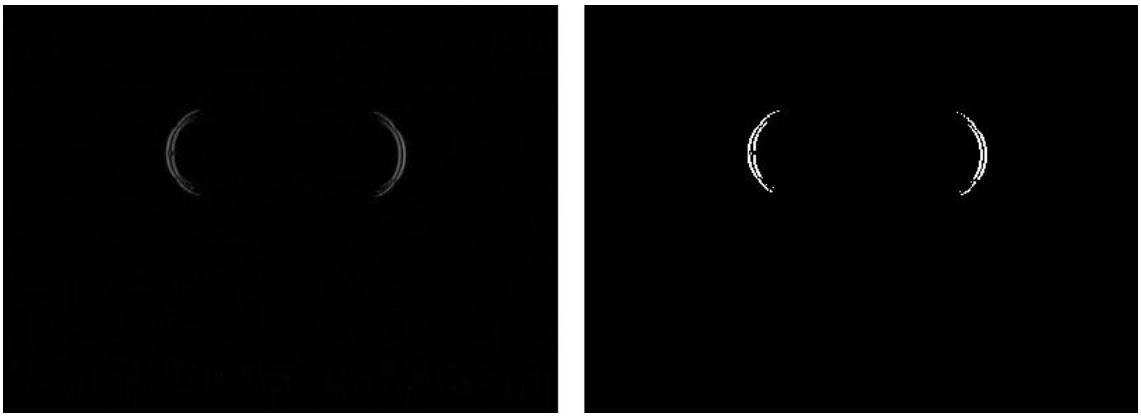
Az előbb ismertetett technikák ugyan elég jó eredményeket hoznak, azonban van egy nagy hátrányuk. Ez a hátrány pedig a számunkra közömbös objektumoknak az észlelése, mint amilyen a cső fala, a szennyeződések, a feliratok és a címkék. Ezek szűrése ugyan a megfelelő különbségképzési technikával, vagy fejlettebb nyomkövető algoritmussal megoldható, ám érdemesebb helyettük eleve egy olyan detektálási módszernek az alkalmazása, mely képes elvégezni ezt a szűrést.

2.3.1.2 Különbségképzés alapú detektálási módszerek

A mozgás alapú detektálások egyik nagy előnye, hogy a korábbiakban ismertetett technikák pozitívumait magukba foglalják, miközben hátrányaikra megoldást nyújtanak, vagyis a számunkra érdekes objektumok detektálása mellett az érdektelenek detektálása megszűnik. Az egyik legalapvetőbb ilyen technika két kép szürkeárnyalatos

különbségének leképezésén alapszik, mely egyszerűsége mellett számos helyen alkalmazható. Attól függően, hogy ezt a két képet hogyan választjuk ki, kétféle módszer is lehetséges.

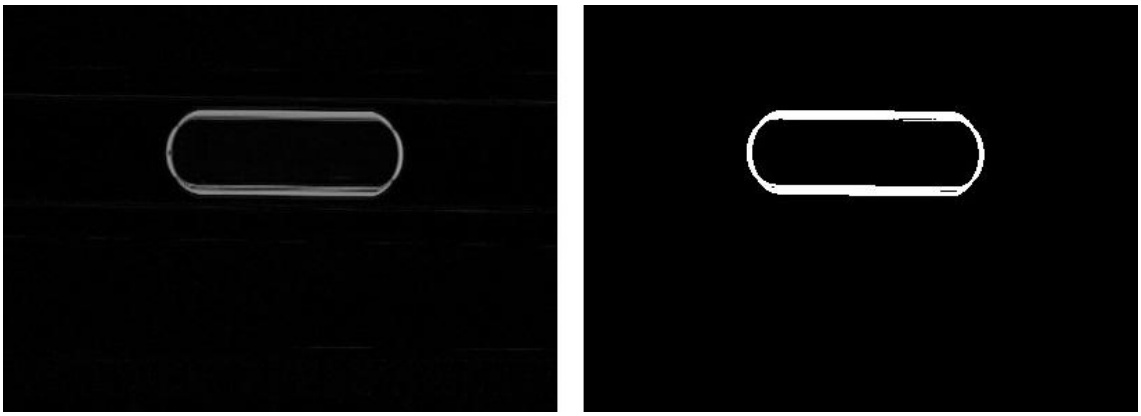
Az első módszer során a különbséget az egymást követő képkockákból képezzük, mellyel lehetséges bizonyos mozgásoknak a lekövetése. Ennek egy kiemelkedő hátránya, hogy hosszú buborékok esetén azok csővel párhuzamos széleinek érzékelése gondot okoz, hiszen az a buborék teljes hossza során közel azonos színű, valamint a módszerből fakadóan a buborék elejének és végének előző pozíciója szellemképként megjelennek. Pulzáló haladás esetén, mely a perisztaltikus pumpáknál előfordulhat, a detektálás olyan további problémákba ütközik, hogy a maszkon megjelenő körvonalak el-eltűnnek amikor a buborék éppen megáll, így ennek lekezelése elengedhetetlen. A módszer használatával készülő maszkokat mutatja a 18. ábra.



18. ábra

Az egymás utáni képkockák különbségén alapuló detektálás buborékok esetén. Jobboldalon a bináris küszöbözés eredmény látható.

A második módszer – az előző javított változata – nem az egymás utáni képkockák különbségét, hanem az aktuálisan feldolgozandó kép és egy referenciakép különbségét képezi. Ezzel a változtatással már nem csak a gáz-, hanem a folyadék fázis detektálására is lehetőség nyílik, hiszen gázbuborékok detektálásához a referenciaképet a folyadékkal teli csőről, folyadék detektálásához pedig a levegővel teli csőről kell készíteni. (A folyadék fázis detektálása, valamint mérése nem része ennek a dolgozatnak.) A módszer alkalmazását a 19. ábra mutatja.



19. ábra

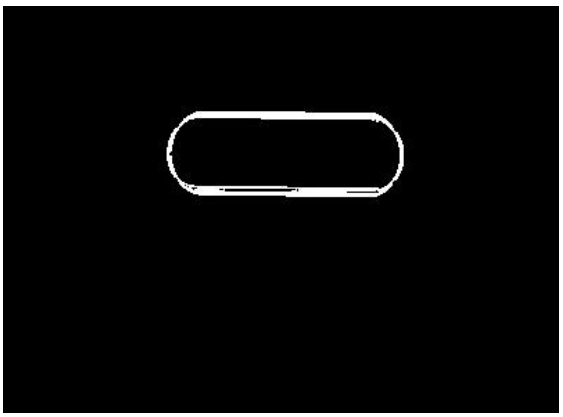
Az aktuális és a referenciakép szürkeárnyalatos különbségén alapuló detektálás szemléltetése. Baloldalon a különbségi kép, jobboldalon annak felerősített változata látható.

A technikával kiváló eredményeket lehet elérni, viszont rendelkezik bizonyos hátrányokkal is. Első ezek között, a szürkeárnyalatos képekre való hagyatkozás, mely a színes képeknél kevesebb információval rendelkezik. Egy másik hátrány a megjelenő, ám később mozdulatlan elemek észlelése, mint amilyen az idővel lerakódó por és egyéb szennyeződések is. Ugyan az említett hátrányok mellett is teljes értékű rendszerek készíthetőek a módszerrel, előfordulhatnak azonban olyan esetek is, ahol a rendszer rugalmasságával szembeni követelmények megkövetelik a bizonyos szintű tanulóképességet.

2.3.1.3 Előtér detektálás

A mozgások detektálásának egy harmadik módszere a különböző előtér detektáló, másként háttérkivonó (background substraction) technikák használata, melyek segítségével a mozgás alapú detektálások előnyeit megtartjuk, miközben egyfajta tanulási képességet is kölcsönzünk nekik. Egy ilyen módszert megvalósító funkció a MOG2 (Mixture of Gaussians), mely az OpenCV-ben a [46], [47] referenciákban olvasható elv alapján került implementálásra, és tanulási rátája, valamint detektálási érzékenysége is állítható. Alapja az exponenciális mozgó átlagolás, mellyel a háttér új értéke a mostani kép α-szorosa, valamint az előző háttér $(1-\alpha)$-szorosa alapján kerül meghatározásra. Egy folyosó felügyeletén szemléltetve, az algoritmus képes elkülöníteni a folyosót az abban mozgó objektumoktól, miközben folyosóra lerakott

tárgyakat a tanulási ráta alapján képes a folyosóhoz sorolni, ha azok elég ideig mozdulatlanok. A funkció használatával készült maszkra példa a 20. ábra.



20. ábra

A MOG2 alapú detektálás során készült maszk.

2.3.1.4 Kiválasztás

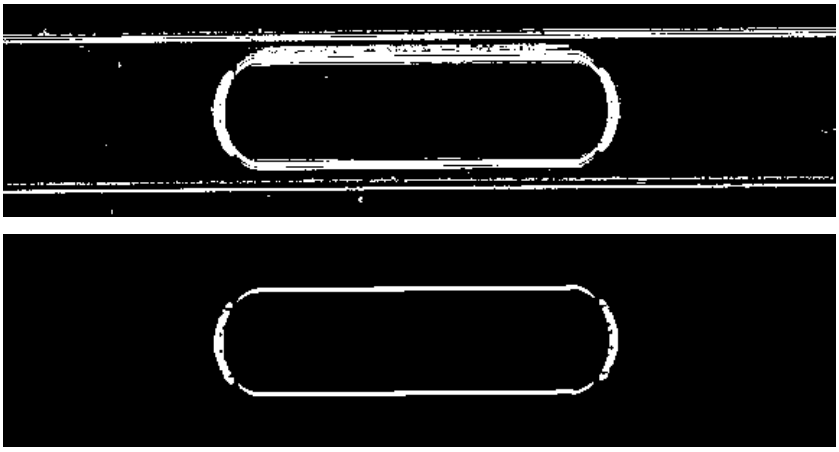
A módszerek előnyeinek és hátrányainak összevetése alapján a referenciaképpel vett különbségképzés alapú detektálás vált a legcélravezetőbb választásnak. Ennek okai között szerepel, hogy a technika önmagában is képes a megfelelő szintű detektálásra, jó minőségű felvételek esetén kellő zajcsillapítással is rendelkezik, továbbá lehetővé válik mindkét fázisnak is a detektálása a megfelelő referenciakép kiválasztásával. Ugyan ezen állítások többsége a MOG2-re is igaz, a hátrányai miatt mégsem az került alkalmazásra. A hátrányok között szerepel a másik módszernél nagyobb számításigény, valamint a tanulási képesség megkérdőjelezhető alkalmazhatósága. Utóbbi alatt azt kell érteni, hogy ugyan a gázbuborékokat felismeri a vízzel teli cső megtanulásával, ám amint a gáz fázis térfogatáramának aránya jóval nagyobb lesz a folyadékéhoz képpest, a rendszer egy idő után a gázzal teli csövet kezdi háttérként értelmezni, és így a gázdetektálásból átvált folyadékdetektálásba. Továbbá, ha a két fázis aránya közel azonos, akkor is gondot jelenthet a rendszer számára egy idő után, hogy mi tartozik a háttérhez, és mi az előtérhez. Ugyan ezek bizonyos szinten orvosolhatóak dinamikus tanulási ráta állítással, valamint a háttér értékének mentésével és visszaállításával, ennek lekezelése feleslegesen bonyolítaná az alkalmazást.

2.3.2 Zavarszűrés és jelerősítés

Mint minden jelfeldolgozó rendszerben, úgy a képfeldolgozásban is elengedhetetlen a zajok és zavarok szűrése, valamint a hasznos jelek erősítése. Ugyan a megfelelő minőségű felvételek biztosításával az alkalmazás feladata egyszerűsödik, mert a kamerarezgés, a fényhatások, valamint a szennyeződések okozta hibák minimalizálhatóak, mégis szükség van olyan eszközök alkalmazására, amelyek ezeken a hibákon felül a nem várt dolgokat is képesek lekezelni.

2.3.2.1 Küszöbözés

Szürkeárnyalatos képek különbségénél a zajelnyomás és jelerősítés egyik alapvető technikája a küszöbözés, mely a legegyszerűbb szegmentációs technikák egyike. Esetünkben csupán a bináris küszöbözés kerül említésre, mivel az alkalmazásban szubpixeles technikák nem kerülnek alkalmazásra. Ennek oka a feldolgozási sebesség növelése, valamint az alkalmazás egyszerűen tartása.



21. ábra

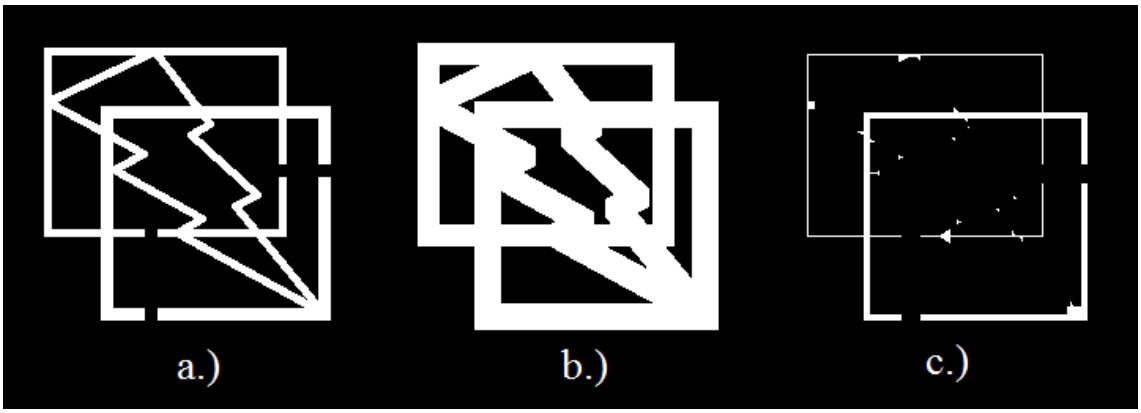
Szürkeárnyalatos kép bináris küszöbözése alacsonyabb (felül) és magasabb (alul) küszöbértékkel.

Szürkeárnyalatos képek esetében a bináris küszöbözés alapja az, hogy ha a pixel világossága a küszöbszint feletti, akkor a pixel új értéke a világossági skála legvilágosabb értéke lesz, ha pedig a küszöbszint alatti, akkor a legsötétebb (így a kép bináris képpé alakítható). Ez, az alkalmazás által használt detektálás mellett, rendkívül előnyösen használható, hiszen a keresett objektumok (általában) sokkal világosabban jelennek meg a szürkeárnyalatos különbségi képeken, mint az egyes zavarjelenségek. Ugyan a mérési elrendezéssel a zavarok minimalizálhatóak, a felvételek elemzése

alapján a cső apró mozgása és az árnyékok változása továbbra is fellelhető, melyek – ahogyan azt a 21. ábra is mutatja – a küszöbözéssel elég jól orvosolhatóak.

2.3.2.2 Dilatáció és erózió

A zajelnyomásnak valamint a jelerősítésnek egy másik módja az erózió és a dilatáció használata, mely a morfológiai műveletek alapkövei. Elvük, hogy (képek esetén) egy képpont új értéke annak meghatározott környezetén (kernelen) belüli képpontok értéke alapján kerül meghatározásra. Konkrétan, a dilatáció szürkeárnyalatos képek esetén maximumszűrőként viselkedik, bináris képek esetén pedig akkor állítja egyesre a pixel értékét, ha a kernel által meghatározott környezetben van egyes érték. Hasonlóan, az erózió szürkeárnyalatos képeknél minimumszűrőként viselkedik, bináris képeknél meg akkor állítja nullára a pixel értékét, ha a környezetben van nullás érték. A dilatáció és az erózió gyorsan és széleskörűen alkalmazható jelek erősítésére és elnyomására, amire példát a 22. ábra mutat.

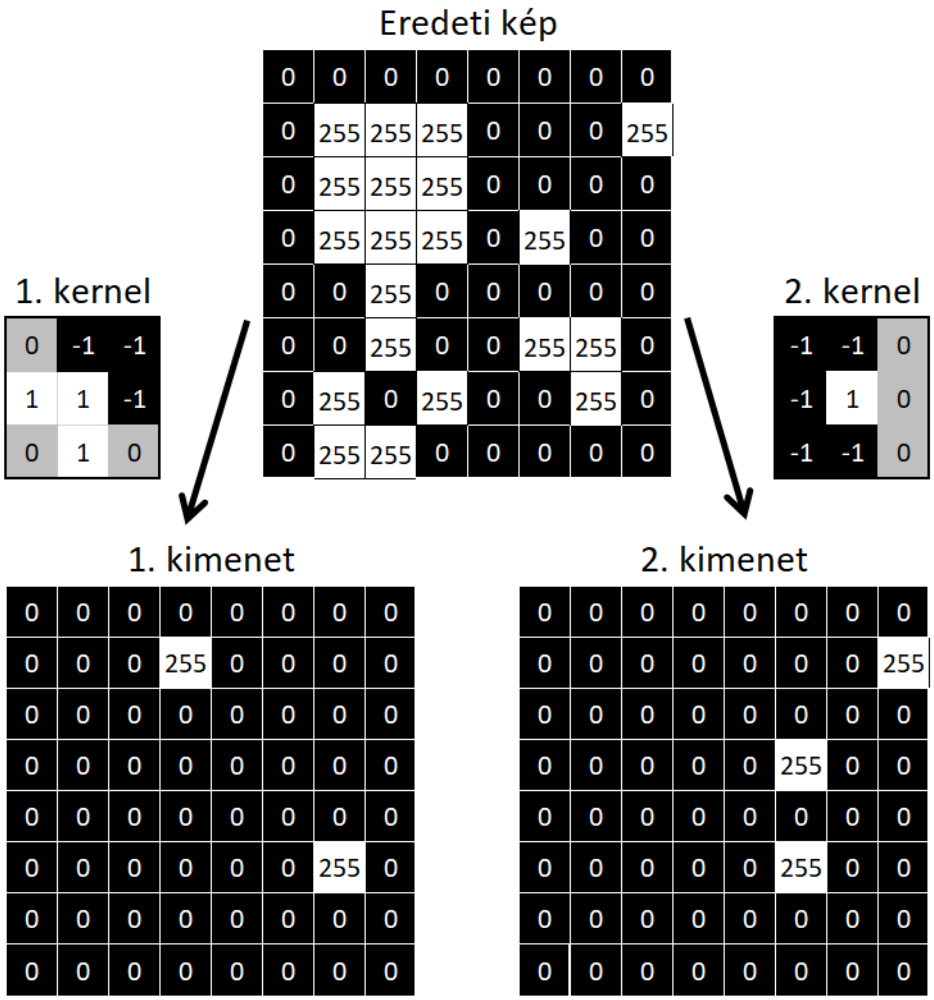


22. ábra

Az a.) bináris képből kiindulva a dilatációnak és az eróziónak a szemléltetése.

2.3.2.3 Hit-or-miss

A dilatáció és az erózió kombinációiból számos morfológiai művelet származtatható, mint amilyen a hit-or-miss is [48]. A hit-or-miss művelet lényege, hogy bináris képek esetén megtalálja a paraméterül adott kernelnek megfelelő pixeleket, így kiválóan alkalmas minták keresésére. A kernelen a fekete, a fehér, valamint a közömbös képpontok pixelhez relatív helyzetét lehet megadni. A műveletet 23. ábra szemlélteti. A hit-or-miss művelet előnyösen alkalmazható az olyan zavarok kijavítására, melyek a gázbuborékok körvonalának egységét – akár vízszintesen, akár keresztirányba is – megbontanák, ahogyan azt az 2.3.2.6 fejezet ábráján is lehet látni.



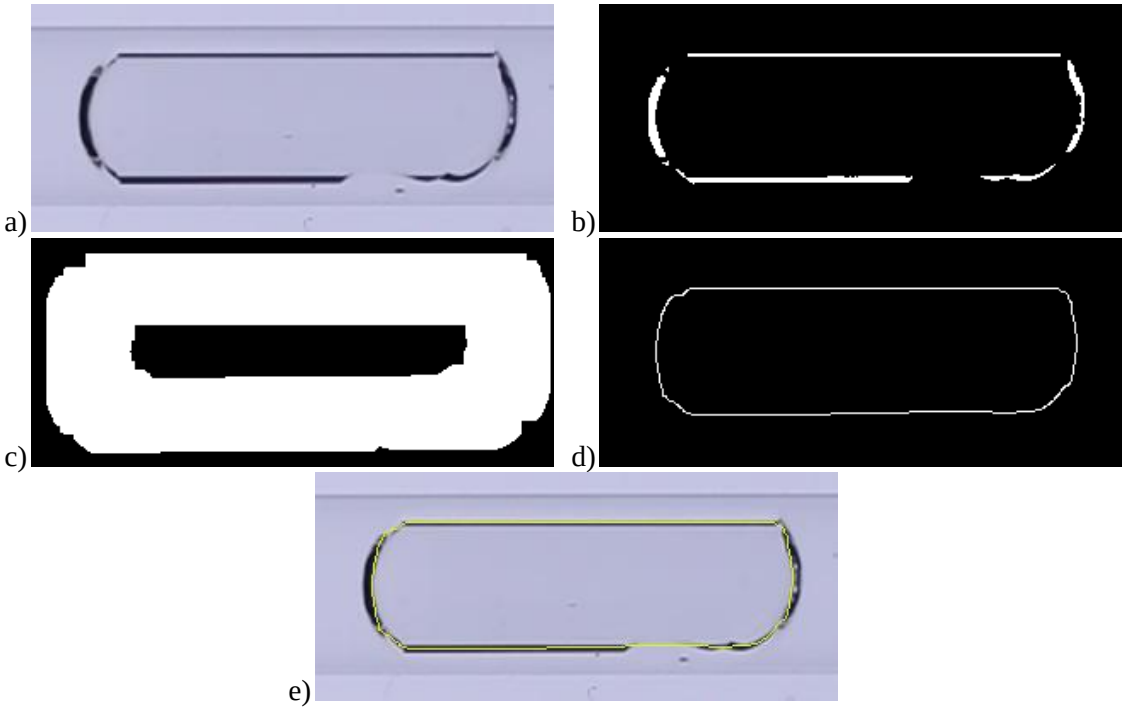
23. ábra

A hit-or-miss művelet szemléltetése két különböző kernel esetén [48]. A kernelekben az 1-es érték a fehér, a (-1)-es a fekete, a nulla a közömbös képpontokat jelöli. Az eredeti kép és a kimenetek 8 bites szürkeárnyalatos képekként vannak kezelve.

2.3.2.4 Vékonyítás

A morfológiai utasítások csoportjához tartozik a vékonyítás (thinning) művelet is, mely bináris képek esetén az erózióhoz hasonlóan a világos pixelek számának csökkentésére használható. Egyik felhasználási módja a csontvázasítás, mely során a régió összeköttetésének a fenntartása mellett csökkentünk az előtér pixeleinek a számán. Az alkalmazás szempontjából ez remekül alkalmazható az olyan esetekben, amikor a buborék körvonalának megtörése túlzott jelerősítéssel kerül megszüntetésre, és ezen finomítanánk. A finomítás nem csak a térfogatszámítás során lehet előnyös, hanem a pontosabb határok megállapítására is. Az említett példát grafikusan a 24. ábra

szemlélteti az a) képen látható gázbuborék körvonalának rekonstrukciójával. Az ábra b) képén a szürkeárnyalatos kép küszöbözése, c) képen annak dilatációja, majd d)-n a c) kép Zhang-Suen algoritmus alapú csontvázasítása [49] látható. Az e) képen a csontváz és az eredeti kép összevetése található.

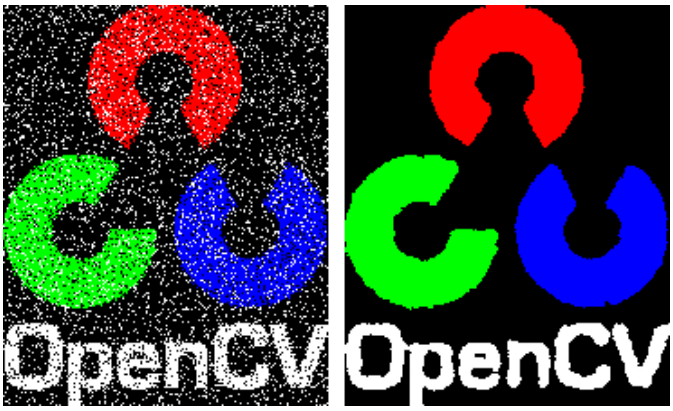


24. ábra

Gázbuborék körvonalának a rekonstrukciója.

2.3.2.5 Szűrők

A zajelnyomási és jelerősítő módszerek közé tartoznak a kép egy meghatározott szűrővel való konvolúciói is, melyeknél az élesítő szűrők használata esetén az élek megtalálása, az aluláteresztő szűrők esetén pedig a zajok csillapítása lehetséges. Az OpenCV által implementált lehetőségek között található az átlagoló szűrő, a medián szűrő, a Gauss-szűrő valamint a bilaterális szűrő is, melyek mind más-más elsődleges felhasználási területtel rendelkeznek. A Gauss-szűrő például a fehér zaj eltüntetésére kiváló, míg a bilaterális szűrés segítségével az élek megőrzése mellett lehet a zajt csillapítani. A medián szűrő pedig jól alkalmazható – nem valós idejű alkalmazások esetén – például a só-bors zaj szűrésére, ahogy azt a 25. ábra is szemlélteti.



25. ábra

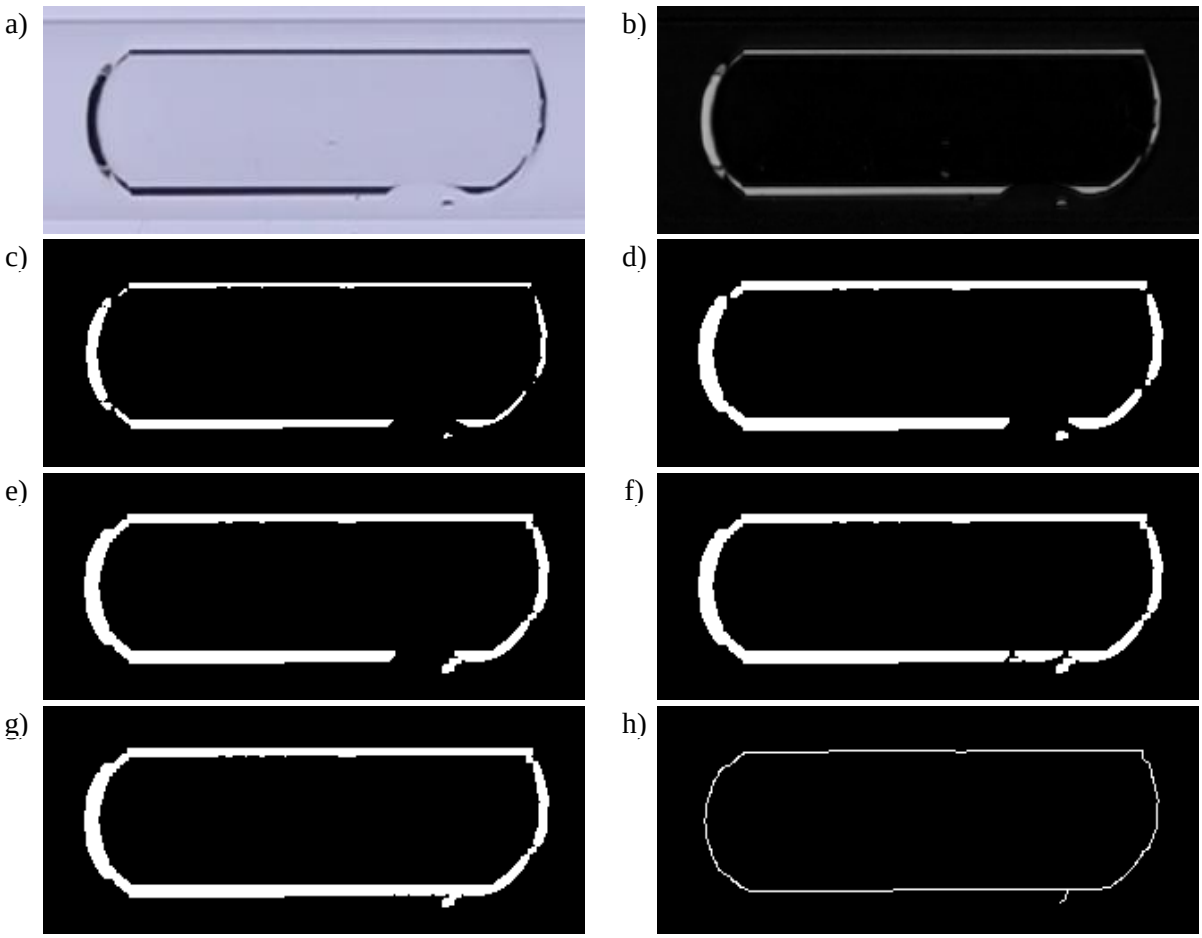
A medianBlur() használatának eredménye egy só-bors zajjal terhelt képen.

2.3.2.6 Összegzés

Mivel az előbbiekben ismertetett technikák nem önállóan, hanem együttesen szoktak a képfeldolgozó alkalmazásokban működni, így ezek egymás melletti vizsgálata elengedhetetlen. Az alkalmazásba kerülő technikáknak, azok sorrendjének és paramétereinek meghatározásához nagy segítséget nyújtott az elkészített felvételeken való tesztelés, mely során a teljesítménybeli és funkcionális szempontok is vizsgálatra kerülhettek. Világossá vált, hogy küszöbözéssel, dilatációval, erózióval, valamint hit-or-miss művelettel megfelelő minőségű zavarelnyomás és jelerősítés kivitelezhető, miközben a valós idejű feldolgozás kritériuma se sérül. Ugyan a vékonyítás vagy a medianBlur() remek eredményekre képesek, egy valós-idejű alkalmazás számára csak megszorítások mellett lennének alkalmazhatóak. Ilyen például a feldolgozandó terület csökkentése, illetve a csak kivételes esetekben való futtatás.

A 26. ábra egy kivételes eset feldolgozását szemlélteti, mely során a buborék körvonala egy meglehetősen hosszú szakaszban megtörik. Az ábrán elsőként a feldolgozásra váró, eredeti kép látható. Ezt követi a b)-vel jelölt, maszkkal vett szürkeárnyalatos különbségképzés, vagyis a detektálás. A detektálási módszert a bináris küszöbözés követi, ami után már bináris képekkel dolgozunk tovább. A küszöbözés zajelnyomásának ellensúlyozására a d) képen egy dilatáció látható. Az e) képen a buborék eleji és végi lekerekedések keresztirányú megszakadását orvosló művelet látható, mely a hit-or-miss operáció eredményeként lehetséges. Ez a dilatációval szemben nem erősíti tovább a vízszintes vonalakat. Az f) és g) képek során a buborékok körvonalának vízszintes megtörése kerül visszaállításra, amely szintén a hit-or-miss

transzformáció segítségével valósítható meg. Az utolsó képen egy csontvázasítás látható.



26. ábra

A zavarok elnyomásának, és a hasznos jel felerősítésének a folyamata.

A tesztelés során az az észrevétel is megszületett, hogy nem érdemes feltétlenül minden zajt eltüntetni már az alkalmazás első szakaszaiban (detektálás, zajszűrés és jelerősítés). Ennek oka az, hogy bizonyos zavarok a későbbi lépéseknél, például a követés szakaszában is szűrhetőek maradnak, és ezzel a feldolgozási idő is csökkenthető.

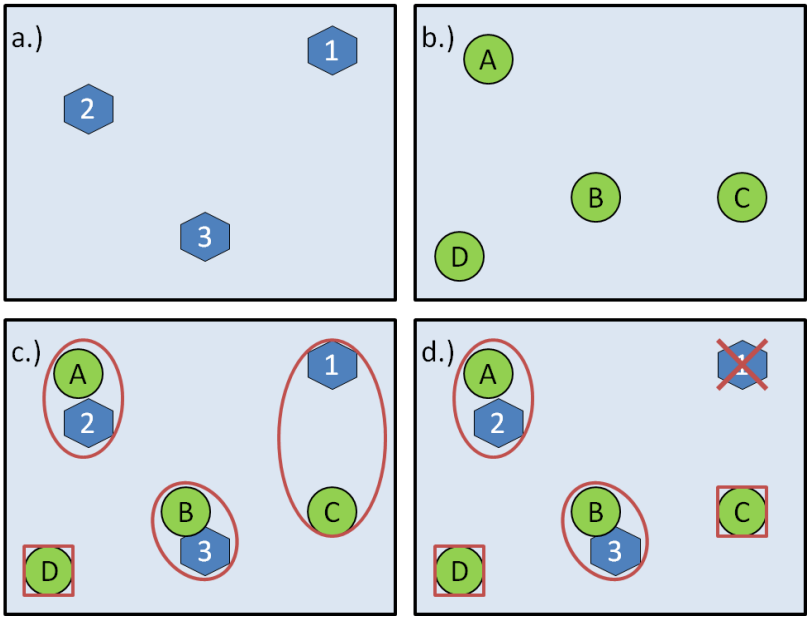
2.3.3 Követés

A mérési elrendezés, valamint a mérési megközelítés miatt, amely a térfogat kiszámítását az elhaladó gázbuborékok folyamatos kiértékelésével éri el, szükséges tudni mely buborékot mértük már meg, és melyiket nem. Ez pedig csak a buborékok követésével lehetséges. A jelenleg tárgyalt alkalmazás esetén több olyan objektumot

kell követni, melyeket külsőleg alig vagy egyáltalán nem lehet megkülönböztetni. Ezt az irodalomban „multi-target tracking”-ként tartják számon [50], és a legnagyobb problémát a tárgy megfeleltetése jelenti az egymás utáni képkockákon, amire több módszer is szóba jöhet [51].

2.3.3.1 Távolságalapú követés

A követés egyik lehetséges megvalósítása során minden detektálandó objektum annak egy pontjával kerül leképezésre, és így a megfeleltetés visszavezethető az azonosított és az új képkockán detektált azonosítatlan pontok közti távolságra. Ha például minden objektumot annak befoglaló téglalapjának középpontjával azonosítunk (melynek mozgása általában kisebb zajjal terhelt, mint az objektum aktuális felületének középpontja), akkor az azonosított és azonosítatlan objektumok pontjainak távolságát egy D mátrixba rendezhetjük, ahol D_{ij} az i. azonosított pont és j. azonosítatlan pont távolsága. Ezek után minden azonosított elemhez a hozzá legközelebbi, bizonyos távolságon belüli, azonosítatlan elemet hozzá lehet rendelni. A párosítási távolság felső határhoz kötése elengedhetetlen az új objektumok megjelenésének és a régiek eltűnésének a lekezeléséhez, melyet a 27. ábra grafikusan is szemléltet.



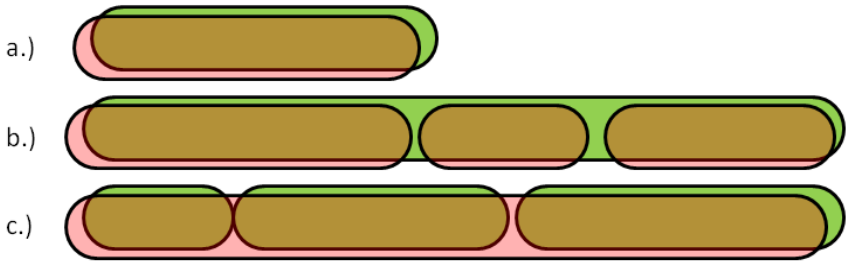
27. ábra

Az a.) képen a már azonosított, míg a b.) képen az azonosítandó objektumok láthatóak. A c.) képen a legközelebbi párosítatlanhoz való párosítás, míg a d.) képen már a maximális távolságot is figyelembevevő párosítás látható. A felvételről eltűnő objektumok áthúzva, míg az újonnan megjelentek négyzettel körülvéve láthatóak.

A módszer egyszerűbb feladatok számára megfelelő követést biztosíthat, de ha a különböző detektálási zavarok nincsenek tökéletesen lekezelve, akkor a párosítás nehézkesebb. Bonyolultabb, valós idejű esetekben a párosítás komplexebb módszerekkel történő megoldása javasolt, mint amilyen a magyar módszer is [52], melynek használatára a [50] során láthatunk példát.

2.3.3.2 Átfedés alapú követés

Egy másik nyomkövető módszer során a detektálandó objektumok azok kétdimenziós területük (például befoglaló-négyszöge) alapján kerülnek leképezésre. A párosítás az azonosított és az új képkockán detektált azonosítatlan területek átfedése alapján végrehajtható. A módszer használatával lehetőség nyílik a szétváló és egyesülő buborékok lekövetésére is, hiszen ahogy a 28. ábra is mutatja, ezen események bekövetkeztekor a kisebb területű objektum közel teljes területével a nagyobb objektumon helyezkedik el, így a változás egyértelműen lekövethető.



28. ábra

A területi átfedésen alapuló azonosítás szemléltetése a buborék zölddel jelzett előző helyzete és a pirossal jelzett – könnyebb megkülönböztetés miatt függőlegesen lentebb tolt– mostani helyzete alapján. A b.) eset a buborékok szétválásának, míg a c.) eset az összeegyesülésének esetét szemlélteti.

2.3.3.3 Állapotbecslés

A rendelkezésre álló módszerek pontosságán tovább javíthat a megfelelő állapotbecslési technikák használata, mert így az azonosítatlan tárgyak helyzetét nem csak az előző képkockán lévő pozíciókkal, hanem az eddigi mozgás alapján becsült helyzetekkel is összevethetjük [50]. Az irodalomban széles körben tárgyalt témakör [41], [53] egyik legelterjedtebb technikája a Kálmán-szűrő, melynek gépi látásban betöltött szerepét Chen [54] foglalja össze.

2.3.3.4 Kiválasztás

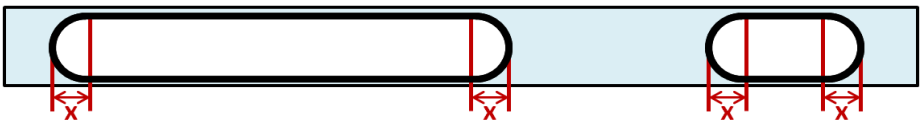
Az alkalmazással szemben támasztott követelmények mérlegelése után a terület alapú követés került implementálásra, állapotbecslő technika alkalmazása nélkül. Előbbi okai között szerepel, hogy a gázbuborékok szétválását és összeolvadását – még ha az a készített felvételeken nem is fordult elő – mindenképpen le kell kezelni, és ez sokkal intuitívabban tehető így meg, mint a pont alapú leképzés esetében. Az állapotbecslők kihagyása mögött pedig az az indok áll, hogy a felvétel minősége, a detektálási és szűrési lépések olyan robusztus rendszert jelentenek önmagukban is, hogy a tesztelések alapján indokolatlan lenne egy állapotbecslő technika beépítése a követésbe.

2.3.4 Térfogatszámítás

A buborék felismerése, majd képkockákon keresztüli követése után a térfogatának meghatározása következik. Ennek során azzal a feltételezéssel élünk, hogy a gázbuborékok nem hosszabbak a vizsgált csőszakasznál. Ez, ahogyan már 2.1.6-ban említésre került, azért szükséges, hogy biztosak lehessünk abban, hogy nem szűnt-e meg az áramlás. A következőkben ismertetett módszerek elsősorban arra építenek, hogy a buborékok kis kapilláris számok[3] esetében jól közelíthetőek egy olyan hengerrel, melynek végein félgömbök vannak [28].

2.3.4.1 Hossz alapú térfogatszámítás

Az első térfogatszámító módszer alapja, hogy minden gázbuborék egy vele azonos hosszúságú hengertől körülbelül ugyanakkora térfogattal tér el, és egy kalibrációs adat segítségével csupán a buborékok hosszából meg lehet állapítani azok térfogatát. Az elmélet vizualizációját a 29. ábra segíti, ahol az x-el jelölt szakaszok mutatják a buborékok lekerekedő részét, melyek a feltételezések alapján, minden – bizonyos hossz feletti – buborék esetén ugyanakkorák.



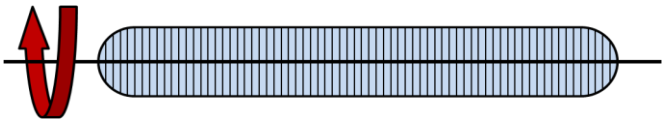
29. ábra

A buborékok szélei ugyanolyan mértékben kerekednek le egy bizonyos buborékhossz felett.

[3] A kapilláris számmal a viszkózus erők és a felületi feszültségek közti összefüggést lehet jellemezni gázok és folyadékok között, valamint nem elegyedő folyadékok közt is [65].

2.3.4.2 „Integráló” térfogatszámítás

Egy másik módszer azon alapszik, hogy – ahogy azt a 30. ábra is mutatja – a buborékot az üvegcső tengelyére forgásszimmetrikusnak feltételezve fel lehet bontani apróbb hengerekre, melyeknek a térfogatát összeadva kiszámítható az eredeti buborék térfogata. A módszer a hengermagasságok finomításával pontosítható, melynél az egy pixeles magasságot feltételezve a tizedmilliméteres nagyságrend is elérhető. A hengerekre való felosztást a buborék körvonala alapján lehet elvégezni.



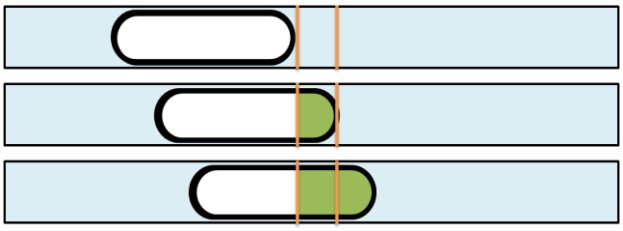
30. ábra

A forgásszimmetrikusnak feltételezett buborék felosztása a térfogatszámításhoz

2.3.4.3 Egyéb módszerek

Az előbbi két módszer mellett még két térfogatszámító technika merült fel. Az első a két kifejtett térfogatszámítási-módszer keverése, melynek alapja az lenne, hogy a buborékok lekerekedő részének a térfogatát a hengerekre osztás módszerével, a buborék csövet végig kitöltő részének térfogatát pedig a hossz alapú módszerrel számolná ki. A módszer használhatósága megkérdőjelezhető, hiszen látszólagosan nem nyújt semmilyen előnyt az eredeti technikákhoz képest.

Egy másik, szintén felmerült módszer alapja az lenne, hogy a csőnek csak egy egész rövid szakasza, egy „szeletkéje” kerülne vizsgálatra (31. ábra). Ezen áthaladva az áramlás mindegyik része egyszer kerülne mintavételezésre, és ebből lenne a térfogat kiszámolva. A módszer hátránya, hogy a szakasz hossza áramlási sebességtől és a képfrissítési frekvenciától is függene, valamint a pulzálva haladás (mely előfordul a perisztaltikus pumpáknál) tovább nehezítené a mintavételezést.



31. ábra

A kisszakaszos mintavételezés szemléltetése, ahol a zöld szín a már mintavételezett részt mutatja. A képek időben fentről lefelé követik egymást.

2.3.4.4 Kiválasztás

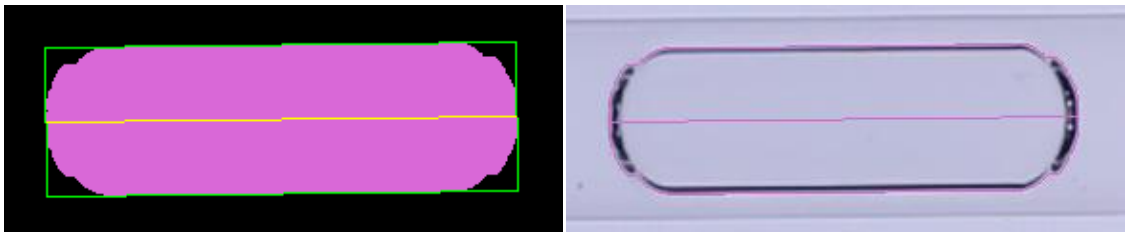
Mivel az alkalmazásnál nem csak a mérési pontosság, hanem a feldolgozási sebesség is fontos, így a hossz alapú térfogatmérési technika kerül implementálásra. Ennek oka, hogy a kapszula alakú buborék hosszát, a körvonalát befoglaló négyszög alapján könnyen ki lehet következtetni, míg például az „integrálós” módszer esetén, csak a körvonal bonyolultabb, lassabb kezelésével lehet kinyerni.

2.3.5 Objektum hosszának kinyerése

A térfogatszámításhoz szükséges hossz megszerzésére több lehetőségünk is van, viszont figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy az üvegcső a felvételen nem feltétlenül lesz a kép tengelyével párhuzamos. Még ha ez az eltérés nagyon minimális is, érdemes figyelembe venni a hosszok megállapításánál a megbízhatóság növelése miatt.

Az egyik lehetőség a cső x tengellyel párhuzamossá tételére a forrás képkockáinak megfelelő mértékű elforgatása. A forgatás után a buborékok hossza azok befoglaló négyzetének szélességéből adódik. A másik lehetőség a hossz kiszámításra, hogy a legkisebb területű befoglaló négyszöget keressük, melynek oldalai a sima befoglaló négyszöggel ellentétben nem feltétlenül párhuzamosak a kép x és y tengelyeivel. Ez a módszer előnyösen használható kiscsatornás Taylor-áramlás esetén. Ennek első oka, hogy a kapszula formájú buborékok hossza átmérőjüknek a többszöröse, és így a megtalált négyszög hosszabbik oldala párhuzamos lesz a buborék falával. A másik indok, hogy a szimmetria és kapszulaalak miatt feltételezhető, hogy a négyzet hosszabbik oldala megegyezik a buborék hosszával.

Annak következtében, hogy a legkisebb befoglaló négyszöges módszer esetén nincs szükség manuális kalibrálásra, valamint, hogy a videókon a cső párhuzamostól való eltérés minimális, a legkisebb befoglaló négyzetes megoldás került implementálásra az alkalmazás során. A hosszok a buborékok külső körvonala alapján lettek meghatározva, mely a 3.2.1.2 fejezetben említendő folyadéknívó leolvasására vezethető vissza. A módszer eredményét a 32. ábra mutatja. Az ábra baloldali képén, a körvonal alapján képzett négyszög zölddel látható, melynek rövidebbik oldalainak közepe sárgán össze lett kötve. A jobboldali képen látható, hogy ez a vonal (itt már rózsaszínnel) jól felhasználható a buborék hosszának megállapításához.



32. ábra

A buborék hosszának mérése a legkisebb befoglaló négyszögével.

Végezetül megemlítendő, hogy egy még általánosabban működő alkalmazás esetén nem elég a buborékok elfordulásának csupán legkisebb befoglaló négyszögekkel való lekezelése. Ennek oka, hogy ha a cső túl nagy szöget zár be a kép (esetünkben x) tengelyével, akkor a buborék körvonalának hossz- és keresztirányú megszakadását orvosló hit-or-miss kernelek is korrigálásra szorulnak. E korrigálásra a képkockák elforgatása mellet nincs szükség, így ennek használata előnyösebb, mint a legkisebb befoglaló négyzeteké.

2.4 Implementálás

Az alkalmazás elkészítéséhez az 2.3 fejezetben ismertetett algoritmusokat implementálni is kellett, mely C++ nyelven az OpenCV segítségével került megvalósításra. Mivel az alkalmazás videók segítségével került kifejlesztésre, a kiértékelés könnyítéséért számos kényelmi funkció is implementálásra került. A videó kapcsán lehetőség van annak lejátszásának szüneteltetésére, valamint a különböző mértékű előre- és hátralépésekre is. A feldolgozott adatok rögzítése videós és szöveges formátumban is lehetséges. Videós esetben az eredeti videóra kirajzolva láthatóvá válnak a kalibrációs adatok, valamint az objektumok adatai is. A szöveges állomány az egyes megmért buborékok adatait, a kalibrálási paramétereket, valamint a feldolgozási sebességeket rögzíti. E rögzítésre kerülő adatok a program futása közben egyaránt kiolvashatóak a konzolból, vagy a GUI-ról is. A zavarszűrés és jelerősítés egyes lépéseinek tesztelésére egy olyan felület is előhívható, melyen az egyes képfeldolgozási lépések, valamint azok paraméterei futás közben is módosíthatóak, és eredményük megjeleníthető. Ezen kényelmi funkcióktól eltekintve az alkalmazás három fő szakaszra bontható. Ezek sorrendben az inicializálási, a feldolgozási, valamint a lezárási szakaszok. A lezárási szakasz csupán a megjelenített ablakok bezárását és az írott fájlok

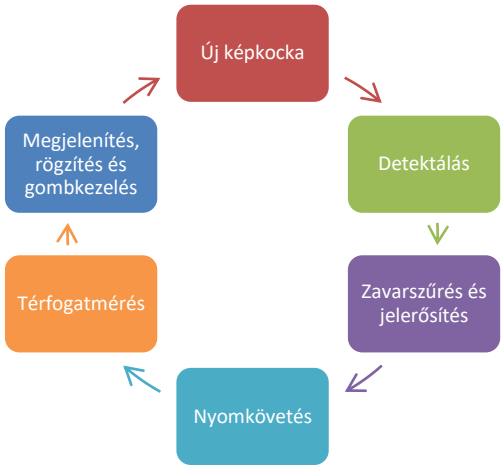
lezárását jelenti, így a következőkben a kalibrálási és feldolgozási szakaszok kerülnek bővebb ismertetésre.

2.4.1 Inicializálás

Az alkalmazás első szakasza az inicializálás szakasza, mely során a felhasználónak ki kell választania a feldolgozandó videót, majd be kell állítania ezen a különbségképzéshez használt maszkot, a referenciatávolságot, valamint a megfigyelendő területet is. Az inicializálási lépések konkrét ipari vagy laboratóriumi megvalósítás esetén egyszerűsíthetőek, hisz a képkockákat kamera biztosítja, a referenciatáv és a vizsgálandó terület pedig markerek elhelyezésével automatikusan kijelölhetőek, így egyedül a maszkok elkészítése igényelhet emberi figyelmet. Ezek ellenére, mivel a készített alkalmazás célja elsősorban a térfogatok gyors és pontos meghatározása, az inicializálás automatizálására nem került sor.

2.4.2 Feldolgozás

Az inicializálás elvégzése után a feldolgozási szakasz következik, melynek működését a 33. ábra szemlélteti. Ez az új képkocka lekérésével kezdődik és a további lépések szempontjából mindegy, hogy videó vagy kamera szolgáltatja azt. A következő lépés az objektumok detektálása, mely során az új képkocka és a (kalibrálás során beállított) maszk szürkeárnyalatos különbségképzése történik. A különbségi kép ezek után küszöbözésen, dilatáción, majd a vízszintes és keresztirányú szakadások megszüntetésére 4 hit-or-miss műveleten esik át. Az így készített bináris kép segítségével lehetőség van a detektált objektumok körvonalainak kinyerésére.



33. ábra

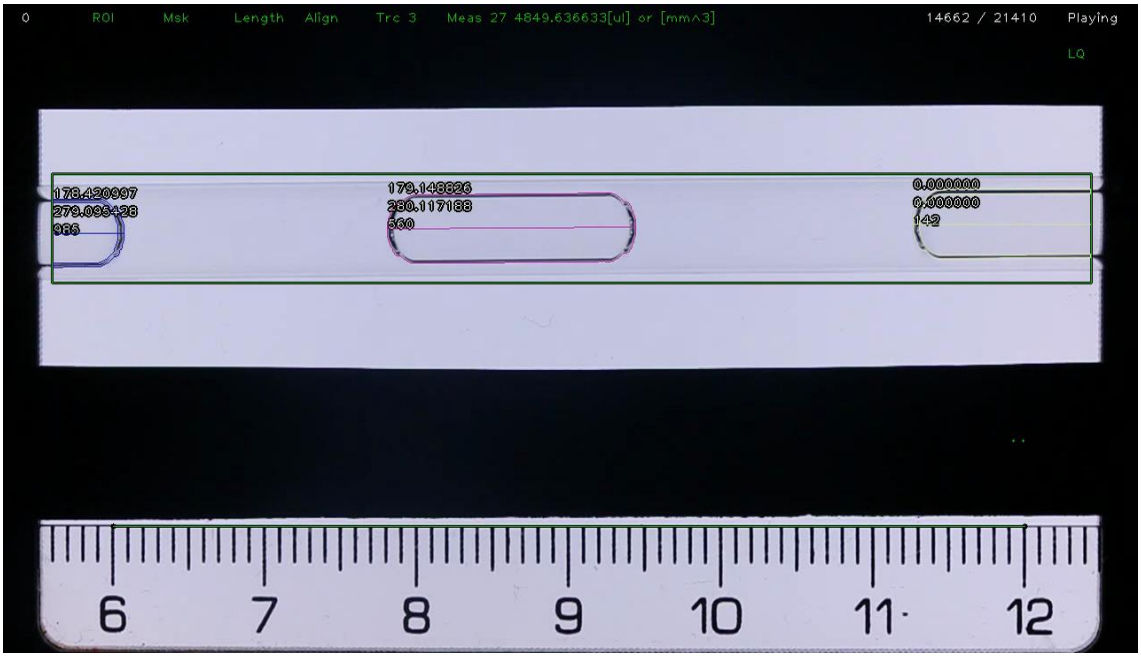
Az alkalmazás feldolgozási szakaszának vázlata.

Az objektumok követése az előzőekben megszerzett körvonaladatok segítségével valósítható meg. Ennek során mindegyik azonosítatlan objektumra meg kell nézni melyik már azonosított objektummal lehet összepárosítani a területi átfedésük alapján. Azon azonosítatlan objektumok, melyek semelyik azonosított objektummal nem lettek összepárosítva, az újonnan megjelenő objektumok. Mivel a zavarszűrés lépéseiben nem minden zavar szűrhető ki, a hibás detektálások lekezelésére a követés csak a megfelelően nagyméretű objektumok esetén hajtódik végre. Ezen felül minden azonosított objektumhoz hozzárendelésre kerül, hogy hány képkockán keresztül lett már követve. Ezen adat a későbbiekben nemcsak a térfogatszámítás, hanem a megjelenítés során is felhasználható, hiszen kis értéke esetén nem kell az objektummal foglalkozni. Azon azonosított objektumok, melyekhez egy azonosítatlan objektum sem került párosításra az eltűnő objektumok. A felvételek minősége és a jelerősítés miatt nem volt szükséges annak lekezelése, hogy az objektum az eltűnése után ismét megjelent volna. (Ám ez, az objektum eltűnése óta bekövetkezett képfrissítések számának tárolásával szintén lekezelhető lenne.) Megemlítendő továbbá, hogy buborékok szétválásának, valamint egyesülésének a lekezelése nem került megvalósításra. Ennek oka, hogy ezek stabil áramlás mellett nem fordulnak elő, így a tesztkörülmények között sem.

A térfogatszámítás során a zavarok elkerülésének céljából három dologra kell figyelni. Az első, hogy az objektum már megfelelő ideje legyen nyomon követve, így a hibás detektálások nem okozhatnak a későbbiekben gondot. A második, hogy a buborék teljes hossza látható legyen. Az utolsó dolog pedig az, hogy a buborék körvonala lehetőleg legyen egybefüggő. Ezen szempontok figyelembevételével a buborék hossza jól közelíthető a körvonalának legkisebb területű befoglaló négyszöge szélességével. A hossz alapján, valamint a kompenzációs értékekkel a buborék térfogata meghatározható.

A feldolgozás szakasz ciklusának utolsó lépéseként az alkalmazás megjeleníti és rögzíti a feldolgozott adatokat, valamint lekezeli a felhasználó interakcióit is. A megjelenítés a konzolos felületen a kalibrációs és feldolgozási időadatok kiírását, grafikus felületen pedig a feldolgozás végső, vagy akár az egyes közbenső lépések eredményének ábrázolását jelenti. A rögzítés a megjelenített szöveges vagy képi információk tárolását takarja. A grafikus megjelenítés az OpenCV beépített GUI-ja segítségével került implementálásra, melyet 34. ábra szemléltet. A beépített GUI-val a gombnyomások és a kijelölések is lekezelhetőek, melyekkel az inicializálási, a kényelmi és az egyéb vezérlési funkciók irányíthatóak. A felhasználói interakciók

lekezelése után a feldolgozási ciklus kezdődik elölről, a forrás új képkockájának lekérésével. Ha a videónak már nincs további képkockája, akkor az alkalmazás a lezárási szakaszba lép, rögzíti a rögzítendő adatokat, majd bezárul.



34. ábra

A térfogatmérő alkalmazás felülete. Működésének szemléltetése a https://youtu.be/1zCG3LI85-I URL-en érhető el.

A feldolgozási ciklus futásának sebessége növelhető, ha a megjelenítés nem a többi lépés után sorosan, hanem külön szálon (thread) futtatva párhuzamosan kerül feldolgozásra. Ebben az esetben egyedül a szálak közötti megfelelő kommunikációról kell gondoskodnunk.

3 TESZTELÉS

Az alkalmazás megvalósítása után annak tesztelése következett. A tesztelések során számos olyan probléma került felismerésre, melyek orvoslása már a korábbi fejezetek során ismertetve lett. Erre példa az objektumok körvonalainak szakadását orvosló hit-ot-miss transzformációk alkalmazása, vagy a detektálási hibák lekezelésére bevezetett objektum élettartamát tároló változó. Ezek miatt e fejezet során nem az alkalmazás egyes lépéseinek tesztelése, majd az ebből leszűrt tanulságok, hanem az alkalmazás való életbeli felhasználhatóságának két legfőbb szempontja kerül tárgyalásra, mégpedig a valós idejű alkalmazhatósága és a mérési pontossága.

3.1 Valós idejű feldolgozás

A valós idejű számítástechnikában egy rendszer jósága nem csak a számításának eredményétől függ, hanem attól az időtől is, ami alatt az eredmény elkészül. A hétköznapi tévhittel ellentétben a valós idejű számítástechnika nem egyenlő a nagysebességű számítástechnikával [55]. Utóbbi célja az, hogy adott feladatcsoportok átlagos válaszidejét minimalizálja, míg a valós idejű számítástechnika célja az, hogy minden feladat időzítési követelménye teljesüljön. Ezáltal a valós idejű rendszerek egyik legfőbb tulajdonsága, hogy megjósolhatóak, hiszen a műveletek biztosan elkészülnek a határidejükre [55], [56]. A valós idő fogalmával továbbá szimulációk esetén is találkozhatunk, ha a szimuláció belső órája a valós órával azonos sebességgel jár, valamint irányítórendszerekben is, ahol az elhanyagolható késleltetést takarja.

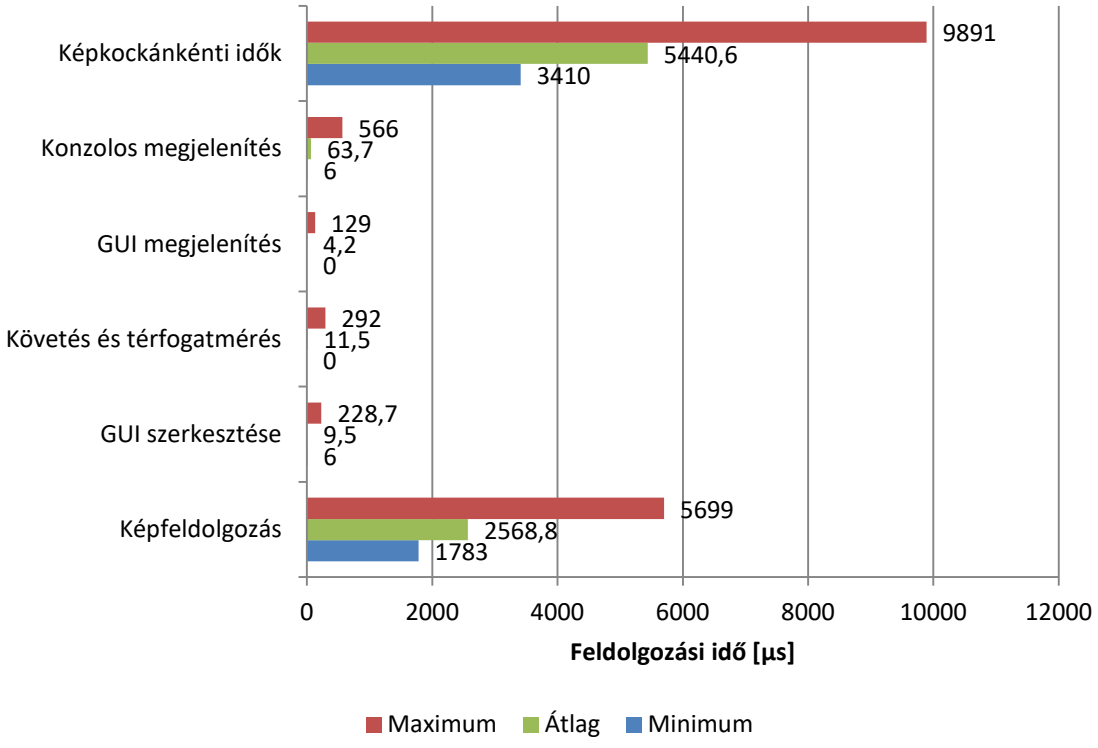
Jelentse esetünkben a valós idejű feldolgozás azt, hogy az alkalmazás képes a vizsgált csőszakaszon aktuálisan áthaladó összes gázbuborék térfogatának meghatározására, méghozzá elhanyagolható késleltetéssel. Ekkor a feldolgozás időadatai alapján következtetni lehet a valós idejű feldolgozás teljesülésére.

Szigorúan véve, a valós idejű számítástechnika követelményeinek való megfelelés a felhasznált eszközökkel nem kerülhetett tesztelésre. Ennek elsődleges kizáró oka a nem valós idejű operációs rendszer (Windows 10) használata. Ám azzal az engedménnyel élve, hogy az alkalmazás futtatása során az egyes feladatok során mért legnagyobb időadatokat vesszük a feladat határidejének, lehetőség nyílik a valós idejű feldolgozás tesztelésére.

3.1.1 Feldolgozási idő

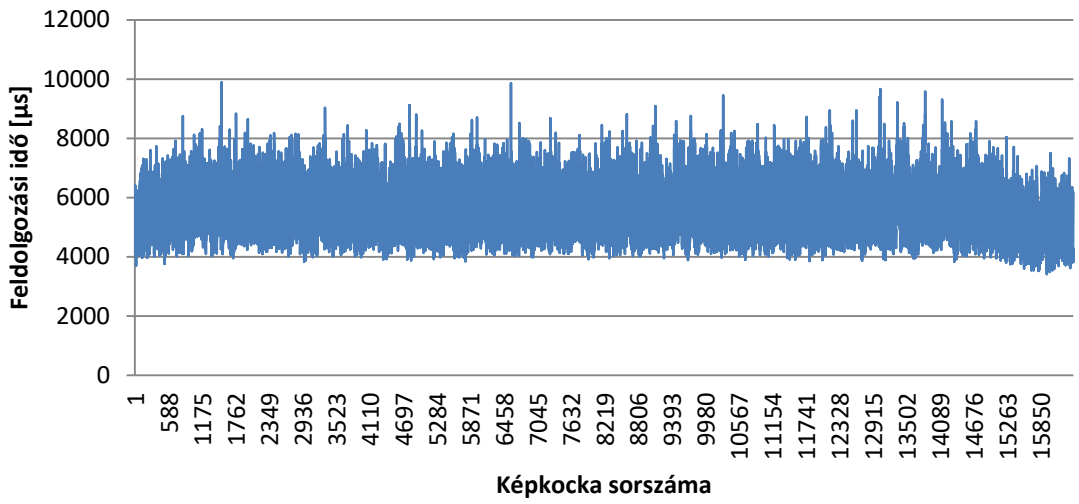
A valós idejű feldolgozás egyik megközelítése, hogy minden egyes képkocka kerüljön (helyesen) feldolgozásra még a következő elérhetővé válása előtt, ami esetünkben 20 ms feldolgozási időt jelent képkockánként. Számos eszköz elsősorban ennek a szigorú feltételnek az elérését szolgálja, mint például a C++ nyelv és OpenCV használata, a megfigyelt terület minimalizálása, valamint a használt képfeldolgozási módszerek gondos kiválasztása is.

A képkockánkénti feldolgozási sebesség mérésre során a megjelenítések párhuzamosan, külön szálon (thread) kerültek lekezelésre. A párhuzamosítás okai között szerepel, hogy soros feldolgozás esetén a konzolra történő írás képkockánként átlagosan 12 ms-et, a GUI frissítése pedig 6 ms-et igényelne, melyek önmagukban is majdnem kitöltik a rendelkezésre álló időkeretet. A mérési adatok szövegesen kerültek rögzítése, videós formában nem. A 35. ábra és 36. ábra egy konkrét felvétel mérési adatait szemléltetik.



35. ábra

Egy videó feldolgozásának időadatai párhuzamos megjelenítések mellett. A képfeldolgozás a detektálást, bináris küszöbözést, a morfológiai műveleteket, valamint a kontúrok megkeresését jelenti. A GUI szerkesztése a GUI-n megjelenő feliratok és ábrák szerkesztését jelenti.



36. ábra

Egy videó összes képkockájának feldolgozási ideje.

Az eredmények kiértékelése alapján kijelenthető, hogy a tesztrendszeren teljesül a valós idejű feldolgozás követelménye. A párhuzamos megjelenítés használatakor a képkockánkénti feldolgozási idő nemcsak 20 ms alá, hanem akár 12 ms alá is szorítható. Az adatok kiértékelésével fény derült továbbá arra is, hogy az átlagos feldolgozási idő – mely exponenciális mozgó átlagolással került meghatározásra – nagy mértékben eltér a maximálistól. Ugyan e különbség egy része magyarázható a feldolgozási ágak számításigényének különbségével, a fő ok vélhetően mégis az operációs rendszer jellegére vezethető vissza. E feltételezést tovább erősíti az a tény, hogy a megjelenítés külön szálon való futtatásakor a szálak közötti kommunikáció átlagosan értékének akár harmincszorosa is lehet a maximális értéke.

3.1.2 Robusztusság

A valós idejű feldolgozás teljesíthető akkor is, ha a képkockánkénti feldolgozási idő túllépné a két képkocka közötti időkeretet. Ebben az esetben azt kell elvárni a rendszertől, hogy legyen elég robusztus ahhoz, hogy egyes képkockák kihagyása esetén is helyes eredményre jusson. Ennek tesztelése – az előző mérési eredmények ismeretében – nem az idők mérésével zajlott, hanem annak megállapításával, hogy a feldolgozandó képkockák mely mértékű kihagyása esetén jut még helyes eredményre az alkalmazás.

A teszt megvalósításához az alkalmazás feldolgozó szakaszának új képkockát lekérő része került módosításra úgy, hogy a videó következő képkockája helyett annak minden n-edik ($n \in \mathbb{Z}^+$) képkockája kerüljön lekérésre. Ezen felül egyedül annak a paraméternek a hangolása volt szükséges, mely meghatározza, hogy egy buborékot hány képkockán keresztül kell minimum követni, hogy térfogata kiszámításra kerüljön. Ennek oka, hogy az eredeti felvételeknél használt küszöbérték magasabb volt annál, mint amennyit a módosított képkockalekérés mellett a buborékok egyáltalán a csőben töltöttek.

A tesztek elvégzésével kiderült, hogy a rendszer elég robusztus ahhoz, hogy a készült felvételeket csupán minden n-edik ($n = 1 \dots 10$, $n \in \mathbb{Z}$) képkocka lekérése esetén is helyesen kiértékelhesse. Az n értékének változtatása nem volt érdemi hatással a mért térfogatokra, továbbá 10-nél nagyobb n nem került tesztelésre. Utóbbi oka, hogy ezen érték már egy 5 képkocka per másodperces frissítési frekvenciájú videó kiértékelésével egyenértékű, mely csak – az esetünkben is fennálló – lassú áramlási sebességek mellett használható.

3.1.3 Valós idejű feldolgozás összefoglalása

Az előzőek figyelembevételével kijelenthető, hogy az alkalmazás teljesíti a valós idejű feldolgozás – általunk meghatározott – kritériumát. Ennek egyik oka, hogy a képkockánkénti feldolgozási idő az alkalmazással szemben támasztott 20 ms-es határ alatt tartható. Másik oka pedig az, hogy ha az előző időkritérium nem teljesülne feltétlenül, az alkalmazás elég robusztus ahhoz, hogy képkockák kihagyása esetén is helyes eredményre jusson.

Érdemes lehet itt megemlíteni, hogy nem minden irodalmi példában megvalósított alkalmazás végezhető el valós időben. Például hangyák együttműködésének a vizsgálata [57] valós időben is kivitelezhető, míg köpködő kobrák köpési viselkedésének a tanulmányozása [58] nem. Ennek oka, hogy a hangyák esetében 30 vagy 60 képkocka per másodperces felvételek is elegendőek, valamint a fontos objektumok is könnyen azonosíthatóak. Ellenben a kobrák gyors mozgásához 125 vagy 250 képkocka per másodperces felvételekre van szükség, valamint a vizsgálandó pontok nehezen követhetőek.

3.2 Módszer alkalmazhatósága

Egy új mérési módszer bevezetése előtt feltétlenül tesztelni kell, hogy annak létjogosultságát, mely leginkább korábbi, más módszerekkel kapott eredményekkel való összevetéssel történik. Amennyiben az adatok összehasonlításakor szignifikáns korreláció tapasztalható, akkor feltételezhető az új módszer alkalmassága az adott feladatra. Ekkor a felhasználáshoz fontos információ a módszer pontossága.

Ahhoz, hogy az alkalmazás mérési pontosságát meg lehessen határozni, számos dolog megfontolásra került a rendszerrel kapcsolatban. A megfontolások között szerepelt, hogy a referencia-térfogatok pontosságát mely tényezők befolyásolják, valamint, hogy a készített mérések bizonytalansága miből származtatható. A következőkben ezen megfontolások, valamint a mérési adatokból leszűrhető következtetések kerülnek bővebben kifejtésre.

3.2.1 Referenciaértékek pontossága

Ismert pontosságú referenciaértékekre nem csak új módszerek jóságának kiértékelésekor, hanem berendezések kalibrálása során is szükség van. Az elvégzett mérések referenciaértékei a 2.1.5 fejezet során ismertetett bürettás módszerrel kerültek meghatározásra. Ennek pontossága fizikai okokból, a mérés többi részétől függetlenül meghatározható.

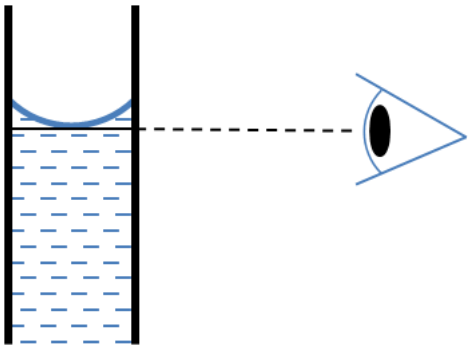
3.2.1.1 Gyártási pontosság, kalibráció

A térfogatmérő eszközök pontosságát befolyásoló tényezők egyike a gyártási pontosságuk, mely meghatározza, hogy a leolvasott értékek mennyire térhetnek el a névlegestől. Ez az érték gyakran az eszközre vésve található meg. Ezen felül a térfogatmérő eszközöket két osztályba is lehet sorolni. Az A osztályba az egy adott hőmérsékleten (általában 20 °C [59]) hitelesített, kalibrálásra nem szoruló eszközök tartoznak, míg a B osztályba a kalibrálásra szorulók [60]. A kalibrálásra szoruló eszközök esetén a névleges és a tényleges térfogat közötti különbség az eszköz korrekciós értéke.

3.2.1.2 Leolvasási pontosság

A bürettás mérés bizonytalanságának egy másik komponense a mért érték leolvasására vezethető vissza. Folyadékok pontos térfogatának mérésekor több dologra

is ügyelni kell [59], [60]. Ezek közül az első, hogy a folyadéknívó (átlátszó folyadék esetén az "alsó" meniszkusz, sötét mérőoldatnál a "felső" meniszkusz) közepén lévő jelzés kerüljön leolvasásra. Az osztásnak megfelelő térfogatok közvetlen leolvasással, a közti értékek becsléssel kerülnek megállapításra. A leolvasás parallaxis hibája elkerülhető, ha a leolvasás szemmagasságban történik. A helyes leolvasást a 37. ábra szemlélteti. A leolvasási pontosság növelhető az ún. Schellbach-féle büretta használatával, melynek hátulján egy sötét csík található, mivel a folyadék „alsó" meniszkuszánál (meniszkusz aljánál) e csík beszűkülése figyelhető meg.



37. ábra

A büretta helyes leolvasása folyadékok térfogatának meghatározására.

3.2.1.3 Egyéb, pontosságot befolyásoló tényezők

A leolvasási és gyártási pontosságon kívül még számos tényező befolyásolja a bürettás mérés pontosságát, mint amilyen a nyomás, az oldódás, valamint a hőmérséklet is. A nyomás alatt elsősorban a bürettában megrekedt gáz nyomását kell érteni, mely eltérhet a légköri nyomáson lévő térfogatától. Ennek oka, hogy a büretta vízszintje nincs feltétlenül egy szintben a külső edényben lévő víz szintjével, mely esetén – a 2.1.5 fejezettel összhangban – a térfogat átváltása szükséges. A rendszerben keringetett anyagok ismeretében nem szabad elfeledkezni a levegő vízben történő oldhatóságáról sem. Ennek következtében fenn áll a lehetősége a levegő keringetés közbeni vízbeoldódásának, melynek hatására a bürettában mért oldatlan gáz térfogata eltérhet az üvegcsőben áthaladóétól. Végezetül megemlítendő a hőmérséklet is, mely a mérőeszközök és mérendő anyagok méretének változtatásával szintén hibát visz a térfogat mérésébe.

3.2.1.4 Összefoglalás

Az előbbiekkel összhangban a bürettás referenciamérésről – a használt anyagok és eszközök tekintetében – a következőek állapíthatóak meg. A használt büretta *A* osztályú, 20 °C fokon kalibrált, 10 ml névleges térfogatú, 0,1 ml beosztású, ±0,03 ml leolvasási pontosságú eszköz volt. A Schellbach-féle büretta használatának ellenére, a köztes értékek leolvasási bizonytalansága további ±0,03 ml hibát visz a rendszerbe. A bürettában lévő gáz légköri nyomásra történő átváltása a vízszintek egy magasságba hozásával elhagyható, így ez fel lett használva a mérések során. Tekintetbe véve, hogy a keringetett ioncserélt víz nyitott tartályban került tárolásra, feltételezhetjük, hogy az oldat ilyen tekintetben telített, és a levegő további oldódása nem történik meg. Mivel a mérésben használt eszközök és anyagok a mérés helyszínén kerültek tárolásra, így azok hőmérsékletei a terem hőmérsékletével kerülnek közelítésre, mely 23 °C volt. Ez ugyan visz bizonyos szintű hibát a rendszerbe, feltételezhető, hogy a videós térfogatmérés esetében is ugyanolyan hibát okoz. Ezen ok miatt ez sem itt, sem később a videós mérés elemzésénél nem volt figyelembe véve.

A felsorolt hibákat az 1. táblázat összesíti. A hibák egybevetésével kijelenthető, hogy a bürettás térfogatméréssel a referenciaértékek ±0,06 ml pontossággal kerültek meghatározásra a mérések során.

1. táblázat

A bürettás mérés hibáinak összegzése.

Korrekciós érték:	nincs
Beosztás pontossága:	± 0,03 ml
Osztások közötti érték leolvasása:	± 0,03 ml
Nyomás:	elhanyagolható
Párolgás:	elhanyagolható
Hőmérséklet:	elhanyagolva
Összegzett hiba	**±0,06 ml**

3.2.2 Videós kiértékelés pontossága

A videós térfogatmérési módszer pontosságának meghatározásához, valamint a megfelelő korrekciók alkalmazásához elengedhetetlen annak megállapítása, hogy a hiba miként jelentkezik. Ez alatt az értendő, hogy a hiba egyfajta konstans különbségként, vagy netalán szorzótényezőként van-e jelen a rendszerben. Ehhez az információhoz

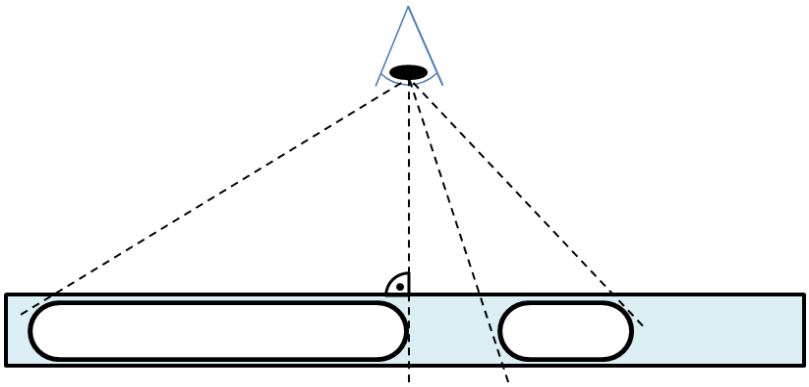
annak megfontolásával lehet hozzájutni, hogy a mérés bizonytalansága miből ered, valamint olyan nagy számú mérés elvégzésével, melyben különböző méretű, ismert térfogatú buborékok kerülnek keringetésre.

Azon okból, hogy a mérések során nem az egyes buborékok, hanem azok együttes térfogata került megmérésre, a videós térfogatmérés pontossága e térfogatértékek és a mérés bizonytalanságát okozó tényezők megfontolása alapján kerül meghatározásra. A következőkben e tényezők, valamint azok feloldása kerül ismertetésre.

3.2.2.1 Bizonytalansági tényezők

A videós térfogatszámítás elsődleges hibája az alkalmazott térfogatszámítási módszerre vezethető vissza. A buborék térfogatának (a 2.3.4.4 fejezettel összhangban) meghatározásához a buborék hosszából és a cső átmérőjéből képzett henger térfogata szolgál alapul. Ez a buborék eleji és végi lekerekedések miatt is korrigálásra szorul. A készített felvételek elemzése alapján e hibát konstansként kezeljük a buborékoknál.

A térfogatmérési módszerhez használt hossz értékéhez is kapcsolhatóak bizonytalanságot okozó tényezők. Ezek közül egyik a csőben lévő nyomás, mely a pumpák általi keringetéshez, valamint a csőben lévő nyomáseséshez köthető. A tényező leginkább szorzótényezőként van jelen. Egy másik, hosszt befolyásoló tényező a parallaxis hiba, melynek oka, hogy – a vizsgált üvegcső kis részétől eltekintve – a buborékok széle nem merőlegesen fentről kerülnek betekintésre. Ezt a 38. ábra szemlélteti. A hiba a merőleges betekintéstől vett távolsággal változik. Megemlítendő továbbá a referenciahosszt szolgáltató vonalzó is, melynek beosztása, valamint videón való kijelölése is okoz némi bizonytalanságot a rendszerbe.



38. ábra

Parallaxis hiba szemléltetése.

A térfogatszámításhoz használt hosszon kívül az átmérőhöz is lehet bizonytalanságot okozó tényezőt említeni. Ez pedig nem más, mint a buborék és az üvegcső fala között lévő vékony folyadékhártya. Ennek értéke a gravitáció miatt ugyan nem konstans a buborék bármely irányába [29], az átmérő tekintetében konstans hibaként kezelhető.

Végezetül, mint minden kamerával történő mérésnél, úgy esetünkben is figyelembe kell venni a kamera lencséje okozta torzításokat is, melyek hatására előfordulhat, hogy az egyenesek a felvételen nem lesznek egyenesek, valamint, hogy a párhuzamosak nem maradnak párhuzamosak. A hiba a felvételen szereplő pozíció függvényében változik, így nem konstans hibaként kezelendő.

3.2.2.2 Nem korrigálandó bizonytalanságok

Az előbb felsorolt bizonytalansági tényezők közül nem mindegyik járul olyan mértékben a térfogatszámítás hibájához, hogy az korrigálásra szoruljon. Ezen tényezők közé tartozik a kamera torzítása, a referenciahossz, a parallaxis hiba, valamint a nyomás is.

A kamera és az objektív torzításainak pontos meghatározása a kamera tesztelésén keresztül lehetséges. A konkrétan használt eszköz esetében ez nem lett elvégezve, ám számos forrás [61]–[64] azt támasztja alá, hogy a használt objektív torzítása minimális, 0,1%-nál nem nagyobb. Ezen okból ennek hibája elhanyagolásra kerül.

Elhanyagolásra kerül továbbá a referenciahosszként használt vonalzó pontossága, valamint a videón való referenciahossz kijelölése. Utóbbi arra vezethető vissza, hogy szub-pixeles éldetektáló módszerek használata ellenére is kellő magabiztossággal lehet a felvételeken a referenciahosszt kijelölni. Az előbbi pedig a miatt kerül elhanyagolásra, hogy a hiba csökkentésének érdekében vonalzó beosztásának két távoli pontja került kiválasztásra.

A buborék széle és az üvegcső fala közötti vékony folyadékhártya is elhanyagolásra kerül a mérés során. A hártya mérete a [29] hivatkozásban található egyenlet alapján 4 μm-es nagyságban mozog a használt perisztaltikus pumpák, anyagok és csövek mellett. Ennek az értéknek a figyelembevételével, a 3.2.2.3 fejezetben ismertetett módszer használatakor a 2. táblázat található értékek nem változnak érdemben. Vagyis a módszer hibájához képest a hártya okozta hiba elhanyagolható.

Ugyanez az indok igaz a cső átmérőjének mérési hibájára is, mely szintén figyelmen kívül marad.

Az előzőekhez hasonlóan, a buborék körvonalának parallaxis hibája is elhanyagolásra kerül. Ennek oka, hogy a videók kiértékelésekor arra derült fény, hogy a buborékok hossza a csőben tartózkodásuk során nem változott szignifikánsan.

Végezetül a nyomás okozta hiba is elhanyagolásra kerül. Ennek egyik oka, hogy a mérési elrendezésben használt minimális csőhosszok nem indokolják meg a nyomás számottevő csökkenését. A másik ok pedig az, hogy az alacsony áramlási sebesség, valamint a főleg vízszintesen elhelyezett csövek nem indokolnak a légköritől lényegesen eltérő nyomást.

3.2.2.3 Bizonytalanságok korrigálása

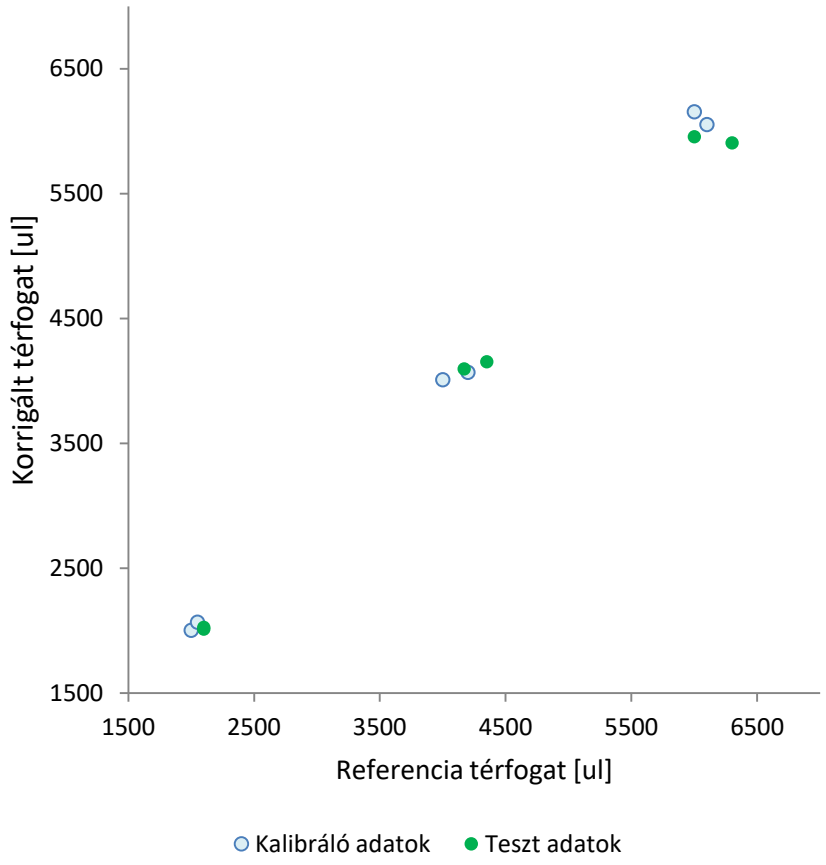
A megfontolások alapján, a bizonytalansági tényezők közül a buborék végeinek lekerekedése okozza a térfogatmérés elsődleges hibáját. A lekerekedésenkénti korrekció nagysága nem elméleti úton, hanem a mérésekből visszakövetkeztetve került meghatározásra. Ehhez a rendelkezésre álló mérések felvételei két csoportra lettek bontva. A kalibrálócsoport a korrekciós érték meghatározásához szükséges, a tesztelőcsoport pedig ennek a korrekciós érték teszteléséhez. Ezzel az a körülmény szimulálható, mintha az alkalmazást a kalibrálás elvégzése után – utólagos kalibrálások elvégzése nélkül – üzembe helyeznék.

A lekerekedésenkénti ideális korrekciós értéke egy felvételnek meghatározható a korrigálatlan és a referencia térfogatok különbsége, valamint a buborékok száma alapján (esetünkben a buborék eleje és vége is lekerekedik). A kalibrálócsoport összes felvételére ezt elvégezve meghatározható egy átlagos lekerekedésenkénti korrekciós érték. Ennek birtokában az összes mérés felvételének korrigált térfogata kiszámítható, melyek birtokában következtetni lehet a videós térfogatszámítási módszer jóságára.

3.2.2.4 Eredmények kiértékelése

A kalibráló- és tesztcsoportban lévő felvételek korrigált térfogatának, valamint a referenciaértékek összevetésekor (39. ábra) jól megfigyelhető, hogy az azonos gázbetáplálási időkhöz tartozó kalibráló- és teszteredmények jó egyezést mutatnak. Ez alapján megállapítható a módszerről, hogy a kezdeti hipotézisnek megfelelően alkalmas lehet a gázbuborékok térfogatának meghatározására Taylor-áramlás esetén. Tekintetbe

véve a módszer alkalmasságát, a továbbiakban a 12 rendelkezésre álló felvétel alapján kísérletet teszünk a módszer pontosságának meghatározására.



39. ábra

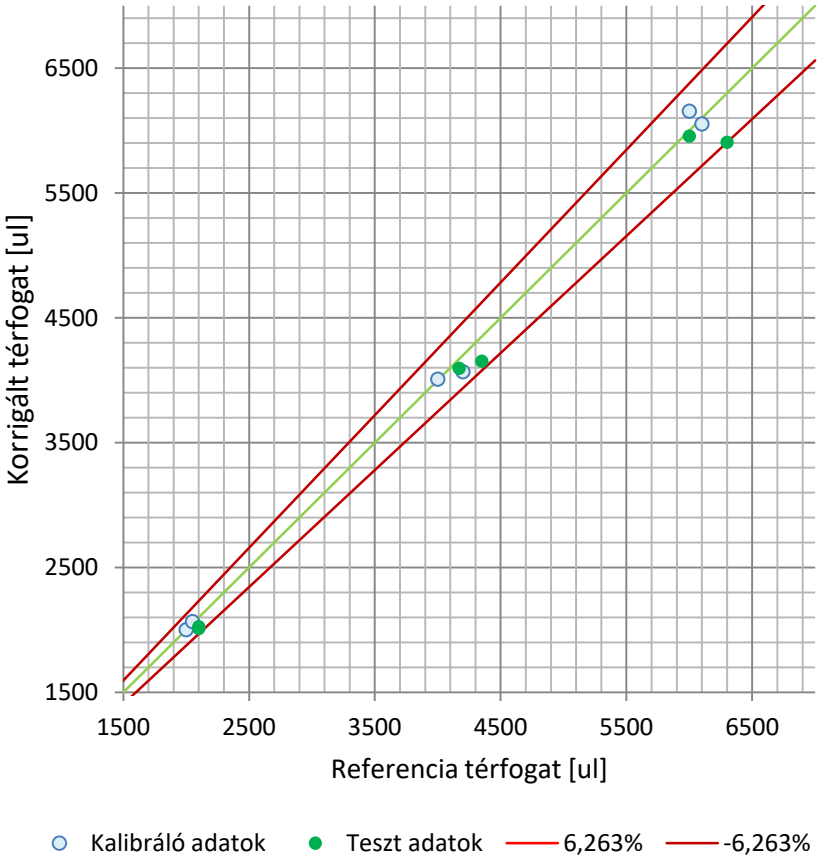
A korrigált- és referenciatérfogatok ábrázolása.

A készített felvételek alacsony száma (12) némileg korlátozza a pontosság meghatározását. Például nem lehetséges annak megállapítása, hogy mely értékek számítanak kiugrónak, így ezek elhagyása sem lehetséges. Hasonlóan nincs arra sem lehetőség, hogy a mért adatok adott pontosságú konfidencia-intervalluma meghatározásra kerüljön, mely előnyösen alkalmazható módszerek pontosságának meghatározásakor. Továbbá egyenesek, valamint trendvonalak illesztése sem releváns. Azon okból, hogy a felvételeken szereplő buborékok hossza nem tér el egymástól szignifikánsan, az sem igazolható, hogy a videós mérésnek csupán konstans jellegű hibája van, szorzó jellegűje pedig nincs.

Mindezek ellenére, a referencia-, valamint a tesztértékek összevetésével többféle következtetést is le lehet szűrni a videós módszer pontosságával kapcsolatban. Fontos, a

tesztadatok és a referenciaértékek pontosságának összevetése, ugyanis ha előbbi pontossága egy nagyságrenddel elmarad a referenciaértékekétől, akkor az új módszer pontossága közelíthető a tapasztalati pontossággal (melyhez képest a referencia pontatlansága elhanyagolható). Abban az esetben viszont, ha a tesztadatok hibája a referenciaértékekénél kisebbnek adódik, a módszer pontosságát a referenciaértékek pontosságával becsülhetjük. Ha az előbbiek közül egyik sem áll fent, akkor új mérések és további megfontolások szükségesek a módszer pontosságának megállapításához.

A lekerekedésenkénti korrekciós érték birtokában az összes mérés korrigált térfogata kiszámítható, melyek referencia-térfogatukkal való összevetését a 40. ábra mutatja. A grafikonon a zöld egyenes a két tengelyen azonos értékeket jelöli. A piros egyenesek a korrigált térfogatszámításnál tapasztalt legnagyobb relatív hibát jelölik. A könnyebb megkülönböztethetőségért a tesztelő- és referenciacsoportok eltérő színnel kerültek ábrázolásra. Az adatok konkrét értékeit 2. táblázat összegzi.



40. ábra

A mérések korrigálásának eredménye.

2. táblázat

A mérési adatok összesítése. A zöld háttérrel jelölt sorok a tesztelő-, a fehéren hagyott sorok pedig a referenciacsoporthoz tartoznak.

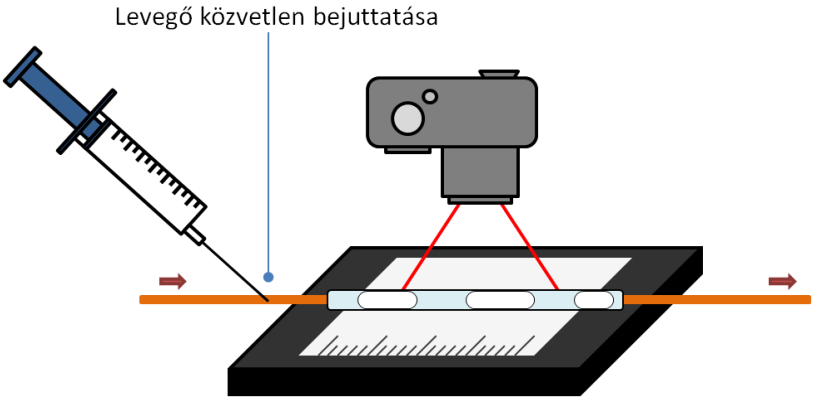
Sorszám	Referencia-térfogat [µl]	Korrigált térfogat [µl]	Hiba [µl]	Relatív hiba
1.	6000	6156,484	156,484	2,608%
2.	6100	6053,964	-46,036	-0,755%
3.	6000	5957,883	-42,117	-0,702%
4.	6300	5903,818	-396,182	-6,289%
5.	2000	2002,742	2,742	0,137%
6.	2050	2067,458	17,458	0,852%
7.	2100	2025,923	-74,077	-3,527%
8.	2100	2011,545	-88,455	-4,212%
9.	4000	4007,585	7,585	0,190%
10.	4200	4067,098	-132,902	-3,164%
11.	4170	4094,841	-75,159	-1,802%
12.	4350	4152,140	-197,860	-4,549%

A 2. táblázat adatai alapján láthatjuk, hogy a tesztadatok pontossága az előbb említett két eset közé esik. Ez alapján azt mondhatjuk, hogy a videós térfogatmeghatározás legfeljebb egy nagyságrenddel ad pontatlanabb eredményt, mint a manuális mérés.

3.2.2.5 Jövőbeli mérések menete

Ahhoz, hogy az előző mérések hiányosságai orvoslásra kerülhessenek, számos dolgon kell változtatni a mérések menetét illetően. Ezek közül az egyik legfontosabb, a mérések számának növelése. Ez a hibák eloszlásának vizsgálatában, a szórások megfelelő kiértékelésében, valamint a kiugró értékek elvetésében is segítséget nyújt, továbbá lehetővé teszi a pontosság konfidenciaintervallumának helyes meghatározását is.

További fejlesztés, ha nem homogén buborékhosszok szerepelnek, valamint a buborékoknak nem csak az össztérfogata, hanem azok egyenkénti térfogata is ismert. Ekkor a térfogatmérés hibájának természete jobban feltárható és értéke jobban megbecsülhető. A buborékonkénti térfogat meghatározása például a gázok manuális fecskendős betáplálásával lehetséges, melyet a 41. ábra szemléltet. Ekkor a referenciaértékek pontossága a használt fecskendő pontosságával közelíthető.



41. ábra

A levegő közvetlen bejuttatásának szemléltetése.

4 KONKLÚZIÓ

Dolgozatom során egy gépi látáson alapuló térfogatmérő alkalmazás, valamint annak tesztelésére létrehozott mérési összeállítás készítését tárgyaltam. Az alkalmazás – az egyre nagyobb ipari figyelmet kapó – kiscsatornás kétfázisú áramlási rendszereknél gyakori, Taylor-áramlás esetén alkalmazható.

Az alkalmazás C++ nyelven az OpenCV segítségével készült. A gázbuborékok detektálása szürkeárnyalatos különbségképzéssel valósult meg. A detektált jelek erősítése, valamint a zavarok elnyomása küszöbözéssel, dilatációval, valamint hit-or-miss műveletekkel történt. A buborékok képkockákon keresztüli követése a területi átfedés alapján valósult meg. A buborék térfogata azok hossza segítségével került meghatározásra, hiszen a buborékok jól közelíthetőek egy olyan hengerrel, mely mindkét végén egy félgömb van.

A buborék végi lekerekedések korrekciós értékének meghatározásához, valamint a mérési pontosság megállapításához a mérések kalibrációs- és tesztelő csoportokra lettek osztva. A kalibrációs csoportban lévő eredmények alapján egy átlagos lekerekedésenkénti korrekciós érték határozható meg. Ezzel az értékkel az összes felvétel korrigált térfogata kiszámolható, melyek hibái alapján következtethetünk a mérési módszer pontosságára.

A készített tesztek alapján kijelenthető, hogy az alkalmazás képes a felvételek valós idejű robusztus feldolgozásra. A mérési adatok kiértékelése alapján kijelenthető, hogy a videós térfogatmérés pontatlansága legfeljebb egy nagyságrenddel nagyobb, mint a manuális, bürettás mérésé. Ugyan az eredmények bíztatóak, a pontosság biztos meghatározásához további, nagyobb mennyiségű mérési adat szükséges.

5 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet szeretném kifejezni, Holló Gábornak, a mérési összeállításban nyújtott segítségéért, Sujbert Lászlónak, a mérési eredmények értelmezésében nyújtott segítségéért, Szemenyei Mártonnak, a gépi látórendszerekkel és fogalmazással kapcsolatos segítségéért, valamint nem utolsó sorban Blázovics Lászlónak és Szűcs Rózsának, átfogó konzulensi tevékenységeikért.

6 HIVATKOZÁSOK

[1] K. Pulli, A. Baksheev, K. Kornyakov, and V. Eruhimov, “Real-time computer vision with OpenCV,” *Commun. ACM*, vol. 55, no. 6, p. 61, 2012.

[2] S. Sivaraman and M. M. Trivedi, “A review of recent developments in vision-based vehicle detection,” *2013 IEEE Intell. Veh. Symp.*, no. Iv, pp. 310–315, 2013.

[3] SICK, “Vision Product catalog 2014/2015.”

[4] Halcon, “Halcon product brochure.” p. 20, 2014.

[5] D. Wu and D. W. Sun, “Colour measurements by computer vision for food quality control - A review,” *Trends in Food Science and Technology*, vol. 29, no. 1. pp. 5–20, 2013.

[6] B. Zhang *et al.*, “Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review,” *Food Research International*, vol. 62. pp. 326–343, 2014.

[7] S. Capel-Cuevas, M. P. Cuéllar, I. de Orbe-Payá, M. C. Pegalajar, and L. F. Capitán-Vallvey, “Full-range optical pH sensor based on imaging techniques,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 681, no. 1–2, pp. 71–81, 2010.

[8] S. Capel-Cuevas, M. P. Cuéllar, I. de Orbe-Payá, M. C. Pegalajar, and L. F. Capitán-Vallvey, “Full-range optical pH sensor array based on neural networks,” *Microchem. J.*, vol. 97, no. 2, pp. 225–233, 2011.

[9] S. Capel-Cuevas *et al.*, “A compact optical instrument with artificial neural network for pH determination,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 12, no. 5, pp. 6746–6763, 2012.

[10] M. Brzozowski, M. O’Brien, S. V. Ley, and A. Polyzos, “Flow chemistry: Intelligent processing of gas-liquid transformations using a tube-in-tube reactor,” *Acc. Chem. Res.*, vol. 48, no. 2, pp. 349–362, 2015.

[11] V. Oncescu, M. Mancuso, and D. Erickson, “Cholesterol testing on a smartphone.,” *Lab Chip*, vol. 14, no. 4, pp. 759–63, 2014.

[12] S. H. Lim, L. Feng, J. W. Kemling, C. J. Musto, and K. S. Suslick, “An optoelectronic nose for the detection of toxic gases.,” *Nat. Chem.*, vol. 1, no. 7, pp. 562–7, 2009.

[13] S. Choi, S. Kim, J. Yang, J. Lee, C. Joo, and H. Jung, “Real-time measurement of human salivary cortisol for the assessment of psychological stress using a smartphone,” *Sens. Bio-Sensing Res.*, vol. 2, pp. 8–11, 2014.

[14] X. Huang, J. Xin, and J. Zhao, “A novel technique for rapid evaluation of fish freshness using colorimetric sensor array,” *J. Food Eng.*, vol. 105, no. 4, pp. 632–637, 2011.

[15] M. O’Brien, D. A. Cooper, and P. Mhembere, “The continuous-flow synthesis of carbazate hydrazones using a simplified computer-vision controlled liquid–liquid extraction system,” *Tetrahedron Lett.*, vol. 57, no. 47, pp. 5188–5191, 2016.

[16] L. F. Capitán-Vallvey, N. López-Ruiz, A. Martínez-Olmos, M. M. Erenas, and A. J. Palma, “Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 899, pp. 23–56, 2015.

[17] M. O’Brien, N. Taylor, A. Polyzos, I. R. Baxendale, and S. V. Ley, “Hydrogenation in flow: Homogeneous and heterogeneous catalysis using Teflon AF-2400 to effect gas–liquid contact at elevated pressure,” *Chem. Sci.*, vol. 2, no. 7, p. 1250, 2011.

[18] D. E. Fitzpatrick, C. Battilocchio, and S. V. Ley, “A Novel Internet-Based Reaction Monitoring, Control and Autonomous Self-Optimization Platform for Chemical Synthesis,” *Org. Process Res. Dev.*, vol. 20, no. 2, pp. 386–394, 2016.
[19] H. Li, H. Ji, Z. Huang, B. Wang, H. Li, and G. Wu, “A New Void Fraction Measurement Method for Gas-Liquid Two-Phase Flow in Small Channels,” *Sensors*, vol. 16, no. 2, p. 159, 2016.
[20] C. B. Tibiriçá and G. Ribatski, “Flow boiling in micro-scale channels-Synthesized literature review,” in *International Journal of Refrigeration*, 2013, vol. 36, no. 2, pp. 301–324.
[21] S. G. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin, and M. R. King, *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. 2006.
[22] C. T. Crowe, *Multiphase Flow Handbook*, vol. 1218, no. 36. 2006.
[23] H. Ji, H. Li, Z. Huang, B. Wang, and H. Li, “Measurement of gas-liquid two-phase flow in micro-pipes by a capacitance sensor,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 12, pp. 22431–22446, 2014.
[24] S. Zeguai, S. Chikh, and L. Tadrist, “Experimental study of two-phase flow pattern evolution in a horizontal circular tube of small diameter in laminar flow conditions,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 55, pp. 99–110, 2013.
[25] K. F. Jensen, “Microreaction engineering — is small better?,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, no. 2, pp. 293–303, 2001.
[26] O. Wörz, K. P. Jäckel, T. Richter, and A. Wolf, “Microreactors, a new efficient tool for optimum reactor design,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 1029–1033, 2001.
[27] P. Angeli and A. Gavriilidis, “Hydrodynamics of Taylor flow in small channels: a review,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 222, no. 5, pp. 737–751, 2008.
[28] R. Gupta, D. F. Fletcher, and B. S. Haynes, “Taylor Flow in Microchannels: A Review of Experimental and Computational Work,” *J. Comput. Multiph. Flows*, vol. 2, no. 1, pp. 1–31, 2010.
[29] Y. Han and N. Shikazono, “Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 30, no. 5, pp. 842–853, 2009.
[30] D. Sanfilippo and P. N. Rylander, “Hydrogenation and Dehydrogenation,” *Ullmann’s Encycl. Ind. Chem.*, pp. 451–470, 2012.
[31] R. Battino and H. L. Clever, “The Solubility of Gases in Liquids,” *Chem. Rev.*, vol. 66, no. 4, pp. 395–463, Aug. 1966.
[32] D. C. Doan Cong Minh and M. Ruel, “Total pressure method. Binary systems cyclohexane-1-pentanol, -1-heptanol, and -1-octanol,” *J. Chem. Eng. Data*, vol. 18, no. 1, pp. 41–44, Jan. 1973.
[33] L. H. Turner, Y. C. Chiew, R. C. Ahlert, and D. S. Kosson, “Measuring vapor-liquid equilibrium for aqueous-organic systems: Review and a new technique,” *AIChE J.*, vol. 42, no. 6, pp. 1772–1788, Jun. 1996.
[34] J. Tan, J. Xu, K. Wang, and G. Luo, “Rapid Measurement of Gas Solubility in Liquids Using a Membrane Dispersion Microcontactor,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, no. 20, pp. 10040–10045, Oct. 2010.
[35] “HALCON – The power of machine vision - MVTec Software GmbH.” [Online]. Available: http://www.mvtec.com/products/halcon/. [Accessed: 12-Oct-2017].
[36] “Machine vision and imaging software - Matrox Imaging Library (MIL).” [Online]. Available: http://www.matrox.com/imaging/en/products/software/mil/. [Accessed: 12-Oct-2017].
[37] “CVB Homepage | STEMMER IMAGING.” [Online]. Available:

https://www.commonvisionblox.com/en/. [Accessed: 12-Oct-2017].
[38] "Machine Vision Library for C++ and .NET - Adaptive Vision." [Online]. Available: https://www.adaptive-vision.com/en/libraries/. [Accessed: 12-Oct-2017].
[39] "Adaptive Vision Studio - Product Overview." [Online]. Available: http://docs.adaptive-vision.com/current/studio/introduction/ProductOverview.html. [Accessed: 12-Oct-2017].
[40] Opencv, "OpenCV Library," *http://opencv.org/*. [Online]. Available: http://opencv.org/. [Accessed: 22-Sep-2017].
[41] P. Pérez, C. Hue, J. Vermaak, and M. Gangnet, "Color-based probabilistic tracking," *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 661–675, 2002.
[42] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004.
[43] A. Lorsakul and J. Suthakorn, "Traffic Sign Recognition for Intelligent Vehicle/Driver Assistance System Using Neural Network on OpenCV," *4th Int. Conf. Ubiquitous Robot. Ambient Intell. (URAI 2007)*, no. Urai, pp. 279 – 284, 2007.
[44] H. Cho, M. Sung, and B. Jun, "Canny Text Detector: Fast and Robust Scene Text Localization Algorithm," in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 3566–3573.
[45] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986.
[46] Zivkovic and Zoran, "Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction," *Proc. Pattern Recognition, 17th Int. Conf. Vol. 2 - Vol. 02*, pp. 28–31, 2004.
[47] Z. Zivkovic and F. van der Heijden, "Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction," 2006.
[48] OpenCV, "OpenCV Documentation," *http://docs.opencv.org/*. [Online]. Available: http://docs.opencv.org/. [Accessed: 22-Sep-2017].
[49] T. Y. Zhang and C. Y. Suen, "A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns."
[50] F. Luetteke, X. Zhang, and J. Franke, "Implementation of the Hungarian Method for object tracking on a camera monitored transportation system," *7th Ger. Conf. Robot.*, pp. 1–6, 2012.
[51] J. Berclaz, F. Fleuret, E. Türetken, and P. Fua, "Multiple object tracking using k-shortest paths optimization," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 9, pp. 1806–1819, 2011.
[52] J. Munkres, "Algorithms for the Assignment and Transportation Problems," *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 5, no. 1, pp. 32–38, 1957.
[53] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," *In Pract.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, 2006.
[54] S. Y. Chen, "Kalman filter for robot vision: A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 11, pp. 4409–4420, 2012.
[55] J. A. Stankovic, "Misconceptions about real-time computing: a serious problem for next-generation systems," *Computer (Long. Beach. Calif).*, vol. 21, no. 10, pp. 10–19, Oct. 1988.
[56] Lamont Wood, "Real-time computing: Gateway to the Internet of things? | InfoWorld." [Online]. Available: https://www.infoworld.com/article/2976337/internet-of-things/real-time-

computing-gateway-to-the-internet-of-things.html?nsdr=true. [Accessed: 09-Oct-2017].

[57] S. Berman, Q. Lindsey, M. S. Sakar, V. Kumar, and S. C. Pratt, “Experimental study and modeling of group retrieval in ants as an approach to collective transport in swarm robotic systems,” in *Proceedings of the IEEE*, 2011, vol. 99, no. 9, pp. 1470–1481.

[58] G. Westhoff, K. Tzschätzsch, and H. Bleckmann, “The spitting behavior of two species of spitting cobras,” *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sensory, Neural, Behav. Physiol.*, vol. 191, no. 10, pp. 873–881, 2005.

[59] Kremper, “Térfogatmérés,” *Debreceni Egyetem, Agrokémiai és Talajtani Intézet*. [Online]. Available: http://www.agr.unideb.hu/~kremper/BSc2.pdf. [Accessed: 15-Oct-2017].

[60] Unknown, “Gravimetria és csapadékok,” *Szegedi Tudományegyetem Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék*. [Online]. Available: www2.sci.u-szeged.hu/inorg/Gravimetria es csapadekok.doc. [Accessed: 15-Oct-2017].

[61] Klaus Schroiff, “Canon EF-S 60mm f/2.8 USM macro - Review / Test Report - Analysis,” 2010. [Online]. Available: http://www.photozone.de/canon-eos/513-canon60f28apsc?start=1. [Accessed: 21-Oct-2017].

[62] Szymon Starczewski, “Canon EF-S 60 mm f/2.8 Macro USM review - Distortion - LensTip.com,” 2009. [Online]. Available: https://www.lenstip.com/178.6-Lens_review-Canon_EF-S_60_mm_f_2.8_Macro_USM_Distortion.html. [Accessed: 21-Oct-2017].

[63] “Canon EF-S 60mm f/2.8 Macro USM Review.” [Online]. Available: http://www.imaging-resource.com/lenses/canon/ef-s-60mm-f2.8-macro-usm/review/. [Accessed: 21-Oct-2017].

[64] Julia Silber, “Lens Test: Canon 60mm f/2.8 Macro EF-S USM AF | Popular Photography,” 2008. [Online]. Available: http://www.popphoto.com/gear/2008/12/lens-test-canon-60mm-f28-macro-ef-s-usm-af. [Accessed: 21-Oct-2017].

[65] T. A. Borbála, “Csepp alapú mikroáramlási rendszerek tervezése és vizsgálata.”