



Miskolci Egyetem
Faculty of Mechanical Engineering and
Informatics
Department of Fluid and Heat Engineering



és



Otto von Guericke Universität
Institute of Fluid Dynamics &
Thermodynamics
Lab. of Fluid Dynamics & Technical Flows



TDK DOLGOZAT

Turbulenciagenerátorban alkalmazott aktív elemek mozgásviszonyainak laboratóriumi vizsgálata

Dorogi Dániel

IV.éves energetikai mérnök hallgató

Konzulens:

Szaszák Norbert

PhD hallgató, Miskolci Egyetem

Lezárás dátuma:

2014 01. 03., **Miskolc**

Eredetiség nyilatkozat

"Alulírott Dorogi Dániel, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2015. január 3.

.....
a hallgató aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	2
JELÖLÉSJEGYZÉK	3
ÖSSZEFOGLALÁS.....	4
ABSTRACT	5
1. Bevezetés: turbulencia és turbulenciagenerátorok	6
2. Mérési elrendezés	10
2.1. A vizsgált aktív rács.....	11
2.1.1. A rács méretei.....	11
2.1.2. A mozgóelemek funkciói.....	12
2.1.3. A rácsban lévő aktív elemek mérésének előkészítése.....	13
2.2. A nagysebességű kamera és a hozzá tartozó berendezések	16
2.2.1. A CMOS kamera.....	16
2.2.2. Az optika	17
2.3. A triggerer	18
2.4. Reflektorelrendezés	19
3. Eredmények.....	21
3.1. Képfeldolgozás alapjai	21
3.2. Az algoritmus ismertetése	22
3.2.1. A keresztkorreláció alkalmazása	24
3.2.2. Minták készítése	25
3.2.3. A korreláció alkalmazása.....	28
3.2.4. Hibakezelési eljárások.....	31
3.2.4.1. A helytelenül megválasztott minták okozta hiba javítása	32
3.2.4.2. Nagy térbeli különbség a szomszédos pozíciók között.....	34
4. Következtetések.....	38
4.1. Az eredmények értelmezése	39
4.2. Célkitűzések.....	43
Hivatkozások.....	44

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Szaszák Norbert *PhD hallgatónak*, aki mind a feladat megoldása-, mind pedig a dolgozat megírása során szakértelmével és tapasztalataival nagyban segítette munkámat. Szeretném megemlíteni, hogy a feladat megoldására – a dolgozatban ismertetésre kerülő módszer mellett – egy másik algoritmus is megírásra került, amelyet közösen fejlesztettünk ki a nyár első felében.

Továbbá szeretném köszönetemet kifejezni Dipl. Ing. Christoph Roloffnak, aki németországi konzulensemként segített megismerkedni a nagysebességű mérés technikával és a bonyolultabb programozási feladatok megoldási lehetőségeivel.

Végül, de nem utolsó sorban, szeretném megköszönni Prof. Dr. Szabó Szilárd *tanszékvezető egyetemi tanárnak* és Dr. Janiga Gábornak, akik lehetőséget biztosítottak arra, hogy a nyári szakmai gyakorlatomat a magdeburgi Otto von Guericke Egyetemen tölthessem, amely nagyban hozzájárult dolgozatom elkészítéséhez.

A kutató munka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák Kiválósági Központban, annak támogatásával készült.

JELÖLÉSJEGYZÉK

u [m/s]	pontbeli sebesség
p [Pa]	pontbeli nyomásérték
T [K]	pontbeli hőmérséklet
u' [m/s]	a sebesség r.m.s. értéke
Tu [-]	turbulencia-intenzitás
$CORR_x$ [pixel]	korrelációmátrix vízszintes irányú mérete
$CORR_y$ [pixel]	korrelációmátrix függőleges irányú mérete
M_x [pixel]	kép magassága
M_y [pixel]	kép szélessége
t_x [pixel]	minta magassága
t_y [pixel]	minta szélessége
$p_x(n)$ [pixel]	adott mozgóelem n-edik pozíciójának x irányú összetevője
$p_y(n)$ [pixel]	adott mozgóelem n-edik pozíciójának y irányú összetevője
max_x [pixel]	korrelációmátrix maximális elemének x koordinátája
max_y [pixel]	korrelációmátrix maximális elemének y koordinátája
C_x [pixel]	a mintán kijelölt középpont x koordinátája
C_y [pixel]	a mintán kijelölt középpont y koordinátája
h [pixel]	a vizsgálati tartomány magassága
w [pixel]	a vizsgálati tartomány szélessége
Δs [m]	a mozgóelem két kép közötti elmozdulása
$\mathbf{v}$ [m/s]	a mozgóelem pillanatnyi sebességvektora

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjaink korszerű mérőrendszereinek alkalmazásával, a turbulenciával kapcsolatos kutatások egyre nagyobb teret nyertek a műszaki tudományok terén. A turbulencia alapvető tulajdonságainak ismerete (például turbulencia–intenzitás, örvényskála, stb.) elengedhetetlen a különböző áramlási testek (például gépjármű, repülőgép, szélturbina-lapátok) aerodinamikai vizsgálatainak során. Ahhoz, hogy a kívánt tulajdonságú áramlásokat laboratóriumi körülmények között is előállíthassuk, turbulenciagenerátorokat alkalmazunk. Ezeknek két fő típusa van: passzív és aktív rácsok.

Méréseimet egy új típusú, költséghatékony aktív turbulenciagenerátoron végeztem, amelyet a magdeburgi Otto von Guericke Egyetemen fejlesztettek ki. A különbség a korábbi típusok és ezen aktív rács között az, hogy a generátor a turbulencia intenzitását flexibilis szilikoncsövek segítségével növeli, amelyeket egy másodlagos levegőáramlás (préslevegő) mozgat, feltételezéseink szerint kaotikusan.

Feladatom a szilikoncsövek mozgásviszonyainak leírása volt. Mivel hagyományos, relatíve kis sebességű képrögzítő eljárásokkal a feladat nehezen lett volna megoldható, így nagysebességű mérőrendszer használata vált szükségessé. Első lépésként a generátorról működés közben felvételeket készítettem, amelyhez egy *ImagerPro-HS4* típusú kamera-összeállítás állt rendelkezésemre. A mérések elvégzéséhez meg kellett határozni a technikai paramétereket: a rögzítendő képek számát, a képek között eltelt időt, a képek felbontását valamint az expozíciós időt. Ezt követően a képek feldolgozása következett, amelyet a MATLAB programcsomaggal végeztem el. A kiértékeléshez elsőként egy „színeken alapuló” algoritmust írtunk, amely több okból kifolyólag nem vezetett megfelelően pontos eredményhez. Mivel a pontosság a munkám során fontos szempont volt, ezért egy másik – normalizált kereszt-korrelációt alkalmazó, tehát jóval nagyobb matematikai háttérrel rendelkező – algoritmust fejlesztettem, amelynek végeredményeképpen a valódi mozgásokat jóval pontosabban lefedő trajektóriagörbéket kaptam.

Dolgozatomban az utóbb említett második algoritmussal foglalkozok részleteiben: kitérek a kereszt-korreláció hasznosságára, ismertetem a képfeldolgozás főbb elemeit, valamint a különböző hibakezelési eljárásokat. Továbbá részletezem a mérési folyamat menetét, az elrendezés alkotóelemeit, illetve azoknak a mérésen belül betöltött szerepeit. A dolgozatban bemutatott munkám alapjául szolgál a későbbi kutatásoknak: a mozgásformák részletes vizsgálatára, az egyes pályagörbék közötti átfedések mértékének felderítésére, valamint, hogy ezek a mozgások valóban kaotikusak-e.

ABSTRACT

Nowadays researches in connection with turbulence are world-wide investigated in technical sciences. The basic properties of turbulence (for instance turbulent intensity or eddy scale) are compulsory to know when different flow bodies are measured. In order to produce flows with determined parameters, turbulence generators are used. These equipment can be classified into two groups: passive and active grids.

During summer 2014 a new type of cost-effective turbulence generator was measured at the University of Magdeburg. The basic difference between this grid and former conventional turbulence generators is that flexible silicone tubes are applied in order to increase the turbulence intensity which is moved by a seconder. This movement is assumed as chaotic.

The task of this work was to investigate the characteristics of the movement. High speed techniques were applied since it could not be carried out by using conventional measurement setups. The first step was to take images about the grid during the process where *ImagerPro-HS4M* type of camera was used. In order to take pictures with sufficient qualities, the parameters of the measurement setup had to be determined, namely the number of images, the time delay between them, the resolution and the exposure time.

After that the data had to be evaluated and it was carried out by using MATLAB. The first algorithm was colour-based, whose accuracy was not sufficient, therefore another script was written using normalised cross-correlation. This process resulted much more punctual moving trajectories. In this study after describing the applied measurement setup, the structure of the secondly written algorithm will be particularised with respect to the building parts and their functions in the algorithm. After that, the results will be evaluated using statistical methods, namely relative frequency.

This study is a part of a large project whose aim is to investigate whether the orbits of the moving elements are chaotic. The literature provides several techniques and one of them is Lyapunov exponent. The plan for the future is to create a script which will calculate this spectra and using this the chaotic behaviour could be investigated.

1. BEVEZETÉS: TURBULENCIA ÉS TURBULENCIAGENERÁTOROK

A természetben számtalanszor találkozhatunk olyan jelenségekkel – mint például a gomolygó cigarettafüst vagy akár a felhők alakjának időbeli változása (Libby, 1996) –, amelyekben fellelhetők a turbulencia jellegzetes vonásai. Miután összehasonlítottuk őket, egy dolog egészen biztosan azonos bennük, ez pedig a kaotikus viselkedés. A korábbi évtizedekben, évszázadokban számos tudós foglalkozott e mozgásforma leírásával, köztük Osborne Reynolds (1842-1912) is, akinek a nevéhez egy híres kísérlet elvégzése fűződik, amely eredményeképp definiált egy, az áramlásokra jellemző dimenziótlan mennyiséget, amelyet később a tiszteletére Reynolds-számnak neveztek el. E mennyiség arányos az áramlásra jellemző átlagsebesség (c) és a jellemző méret (d) szorzatával, és fordítottn arányos a folyadék kinematikai viszkozitásával (ν): $Re = c \cdot d / \nu$. Ezen érték alapján eldönthető, hogy a rendszerben mozgó folyadék turbulensen vagy laminárisan mozog-e. Osborne kísérletei során egy csőben áramló folyadék mozgását vizsgálta, amelyre vonatkozóan megállapította, hogy a lamináris áramlás felső határa a Reynolds-szám tekintetében – amennyiben a fluidum víz – a 2300-as érték körül alakul, ezen érték felett az áramlás minimális zavarás hatására is turbulenssé válhat. Ezek az értékek különbözőek lehetnek, ha vizsgálatainkat más körülmények között végezzük (például nyitott felszínű csatornában). Előfordulhat az is, hogy a lamináris áramlás határára vonatkozó Reynolds-szám értéke jelentősen megnő, amennyiben nem zavarjuk meg a folyadékmozgást (akár 40000-res érték is elérhető, miközben az áramlás lamináris). Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a Reynolds-szám a tehetetlenségi és a súrlódási erők hányadosa, amiből következően ennek értéke a viszkozitás függvénye is, tehát a folyadékáramlás típusa nagymértékben függ magától a fluidumtól is. Mivel a viszkozitás számos folyadék esetén hőmérsékletfüggő, ezért az is nyilvánvaló, hogy a Reynolds-számot egyéb fizikai mennyiségek is befolyásolják. (Lajos, 1992)

Azonban, ha feltesszük a kérdést, hogy valójában mit is értünk turbulencia alatt, a Reynolds-szám nem ad rá kielégítő választ. Ezzel a kérdéskörrel sok kutató foglalkozott korábban, köztük J.O. Hinze, aki az alábbi definíciót adta: „Turbulence fluid motion is an irregular condition of flow in which the various quantities show a random variation with time and space coordinates, so that statistically distinct average values can be discerned” (Hinze, 1975). Vagyis a turbulencia a folyadékmozgás egy szabálytalan formája, ahol a különféle mennyiségek véletlenszerűen változnak az idő és a hely tekintetében. Mivel leírása analitikai módszerekkel igen nehézkes és hosszadalmas lenne, ezért különféle statisztikai átlagmennyiségeket vezetünk

be. Ilyenek például a sebesség, a nyomás és a hőmérséklet, amelyeket az alábbi egyenlet szerint definiálunk. (Hinze, 1975)

$$\begin{aligned}u(x, t) &= \bar{u} + u'(x, t) \\p(x, t) &= \bar{p} + p'(x, t) \\T(x, t) &= \bar{T} + T'(x, t)\end{aligned}\tag{1.1.}$$

Látható, hogy az egyenlet jobb oldala két tagot tartalmaz: az első tagot átlagsebességnek nevezzük, a másodikat pedig az átlagtól való eltérésnek, fluktuációnak (angol szakirodalomban *fluctuation*), amely pontról pontra más értéket vesz fel. A fluktuációfüggvényt különféle áramlástechnikai mérések segítségével tudják meghatározni (például HWA – Hot Wire Anemometry). Ez úgy történik, hogy a sebességet egy adott pontban, magas mintavételi frekvencián akár több ezerszer is megméri, majd a kapott adatokból kiszámítják ezek helyi átlagát, majd végül a pillanatnyi értékekből kivonják az átlagértéket. A pillanatnyi sebességértékek fluktuáció értékeit a négyzetre emelve, majd a kapott értékek átlagát véve kapjuk a varianciát, mely tehát egyetlen érték egy teljes mérési sorozatra. A variancia négyzetgyöke pedig az úgynevezett r.m.s. érték (u'), azaz a négyzetes középérték. E két érték – tehát az r.m.s. és az átlagérték – hányadosát nevezzük turbulencia-intenzitásnak, amely információt ad számunkra a turbulencia mértékéről (1.2). Amennyiben a folyadékmozgás lamináris, e mennyiség értéke zérus, hiszen lamináris esetben a sebesség konstans az idő függvényében, így szórása is zérus.

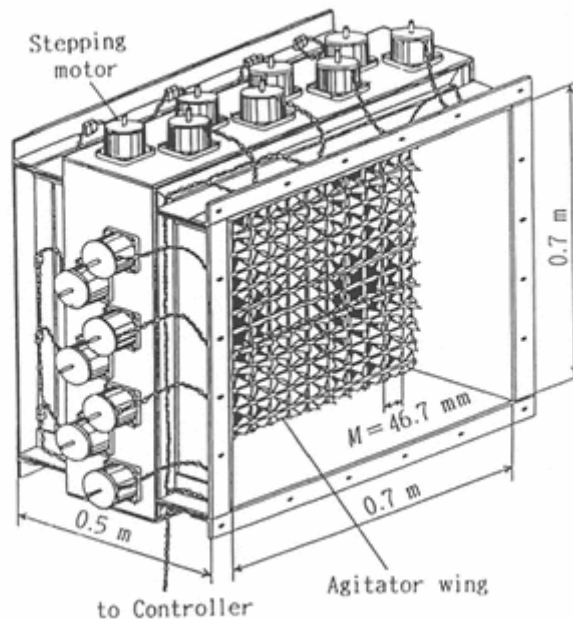
$$Tu = \frac{u'}{U}\tag{1.2.}$$

Ismert, hogy a természetben előforduló áramlások túlnyomó része turbulens, így a különböző áramlási testek (autó, repülőgép, szélturbina lapátozása) laboratóriumi mérései során elengedhetetlen a valódi áramlási viszonyok előállítása, amelyet például turbulenciagenerátorok segítségével érnek el. Úgy, mint a turbulencia, ezen eszközök tervezése, kutatása is hosszú múltra tekint vissza. Ennek egy kezdetleges formáját Simmons és Salter (Simmons, 1934) készítette 1934-ben, amely konstrukció nem tartalmazott mozgó elemeket, ezért passzív turbulenciagenerátornak nevezzük. Legfőbb hátránya, hogy az intenzitást csak csekély mértékben (4-5%-kal) növelte, ezért egy olyan eszköz építése vált szükségessé, amely jóval nagyobb turbulenciát állít elő. Ezt egy olyan gép beépítésével érték el, amely a rendszerbe többletenergiát visz be. Az így megépített konstrukció már mozgó elemeket is tartalmazott,

amely tulajdonképpen a turbulenciagenerátorok másik nagy csoportja, az aktív rácsok közé sorolható, amelyek első prototípusát Gad-el-Hak & Corrsin készítette 1974-ben.

A többletenergiát – amelyet kinetikus energia formájában közölték a szélcsatornában áramló közeggel – gázsugarak fedezték (Gad-el-Hak, 1974). Így a csatornában maga a vizsgálandó közeg áramlása és az intenzitást növelő turbulenciagenerátor által biztosított folyadék mozgása volt jelen. Ezen elrendezés sokkal jobb eredményeket mutatott az imént említett példához képest, ugyanis az intenzitás nagyobb volt, sajnos azonban a költségeket tekintve sokkal nagyobb anyagi ráfordítást igényelt.

Az aktív turbulenciagenerátorok egy másik szemléletes példáját H.Makita & K.Sassa (Makita, 1990) illetve fejlesztését később Mydlarski & Warhaft (Mydlarsky, 1996) készítették. A konstrukció lényege, hogy a szélcsatornába vízszintesen és függőlegesen rudakat helyeztek el és ezeken egymástól meghatározott távolságra szárnylapátokat rögzítettek, majd a rudakat léptetőmotorokkal mozgatták meghatározott fordulatszámmal, így az áramló közeghez időben gyorsan változó, többlet kinetikus energiát adott. Az általuk megépített korszerűbb generátortípus az alábbi ábrán látható (1.1. Ábra). Kérdésként merülhet fel, hogy milyen alakú szárnyat érdemes alkalmazni. E kísérlet során a megalkotók négyszög alakú profilt használtak, de egy későbbi tesztorozat során Kang et. al (Kang, 2003) méréseket végzett hatszög alakú szárnyakra is, amelyeknek nagyobb hatásuk volt a turbulencia intenzitására.

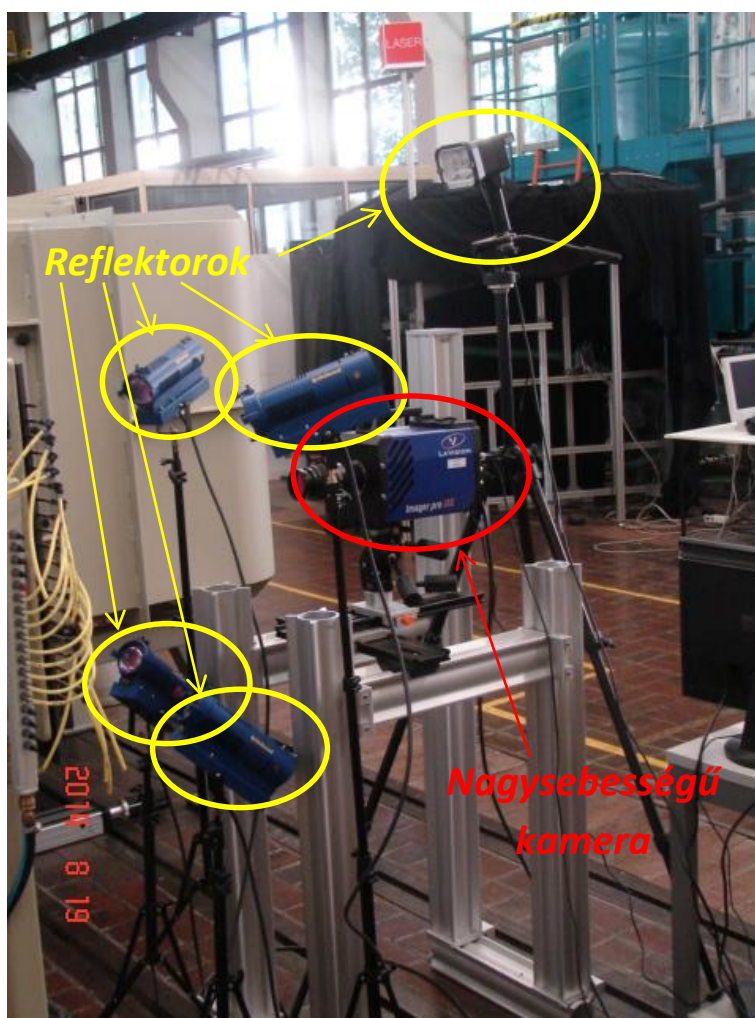


1.1. Ábra: H.Makita & K.Sassa által épített aktív turbulenciagenerátor szerkezeti felépítése (Makita, 1990)

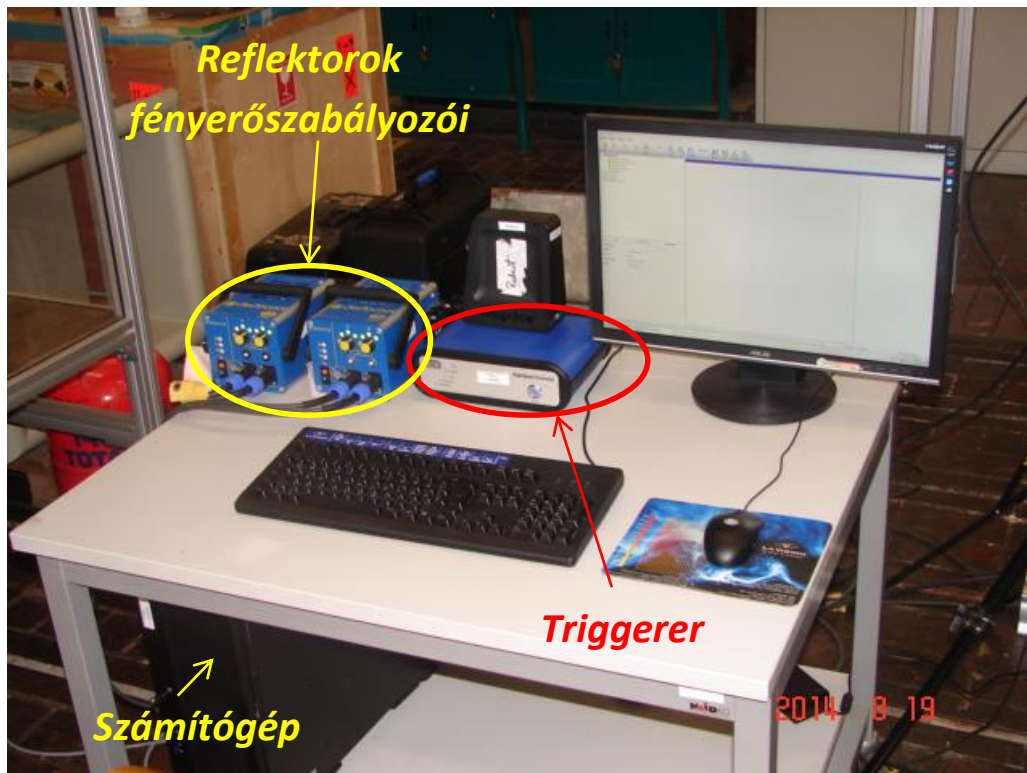
Ha összehasonlítjuk a turbulenciagenerátorok két fő típusát, láthatjuk, hogy egyszerű felépítésükből adódóan a passzív rácsok sokkal olcsóbbak, azonban az intenzitást csak kis mértékben növelik, ellenben az aktív rácsok sokkal nagyobb intenzitású áramlást idéznek elő, de előállítási költségük nagyságrendekkel magasabb. Ebből az okból kifolyólag egy olyan aktív turbulenciagenerátor készítése vált szükségessé, amely a turbulenciát nagymértékben növeli, és nem igényel akkora anyagi ráfordítást, mint a korábbi fejlesztések. Ennek egy kiváló példája a magdeburgi Otto von Guericke egyetemen készített aktív elemeket tartalmazó konstrukció, amelynek alapja egy passzív rács, és ennek rácspontjaiba flexibilis szilikoncsöveket szereltek. E csöveken keresztül szekunder levegő (préslevegő) áramlik a szabadba, mozgásba hozva azokat. A korábbi mérési eredmények alapján átlagosan a turbulenciagenerátor az intenzitást 19%-kal növelte.

2. MÉRÉSI ELRENDEZÉS

Ahhoz, hogy egy fizikai rendszert vizsgáljunk, megfelelő mérési elrendezés készítése szükséges. Ehhez figyelembe kell venni a rendszer jellegzetes paramétereit, mint például a folyamatok lejátszódásának sebességét. A vizsgált turbulenciagenerátorban ezen érték kimondottan magas, ugyanis a szilikoncsöveket támadó nyomás 6 bar , ebből kifolyólag a gyorsan mozgó csövek vizsgálatához nagysebességű technika használata vált szükségessé. Az elrendezés öt fő részből állt: a nagysebességű kamerából, a képek készítési frekvenciáját megszabó triggererből, a kamerát vezérlő, majd az adatokat feldolgozó számítógépből, a vizsgált aktív rácsból, valamint a rácsot megvilágító nagyteljesítményű reflektorrendszerből.



2.1. Ábra: A mérőrendszer felépítése: a nagysebességű kamera és a reflektorok

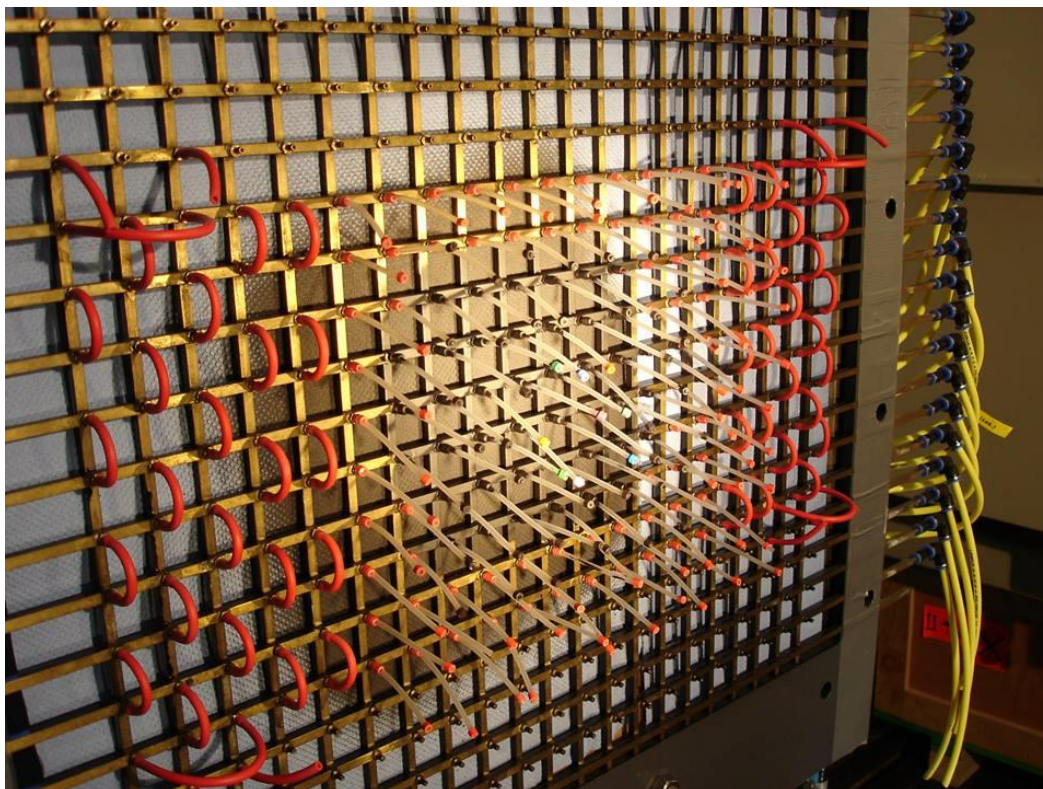


2.2. Ábra: A mérőrendszer felépítése: triggerer, számítógép és reflektorok fényerőszabályozói

2.1. A vizsgált aktív rács

2.1.1. A rács méretei

Ahogy azt az előző fejezetben megfogalmaztam, a legfőbb hátránya a korábbi fejlesztésű turbulenciagenerátoroknak, hogy a nagy intenzitás mellett a gyártási költségük meglehetősen magas. Ebből az okból kifolyólag 2011-ben Magdeburgban kifejlesztettek egy költséghatékony aktív rácsot, amelynek szerkezeti felépítése két fő készre bontható: az alapja egy hagyományos passzív rács, vízszintesen és függőlegesen elhelyezkedő $D=5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ négyzet keresztmetszetű, üreges rudakból összeszerelve, amelyek $M=25\text{ mm}$ távolságra vannak egymástól. Ezt a távolságot rácsállandónak nevezzük – az angol szakirodalom szerinti *M-mesh size* –. Továbbá fontos megemlíteni, hogy a horizontális irányban elhelyezkedő rudakba furatokat készítettek abból a célból, hogy biztosítsák a levegő útját a rácson át a flexibilis csövek felé. Így a rácsponthoz, a rács síkjára merőlegesen elhelyezett flexibilis csövek a légáramlás hatására mozgást végeznek, létrehozva ezzel az aktív turbulenciagenerátort. A leírt konstrukció az alábbi ábrán látható. (Szászák, 2011)



2.3. Ábra: A magdeburgi aktív turbulenciagenerátor szerkezeti felépítése

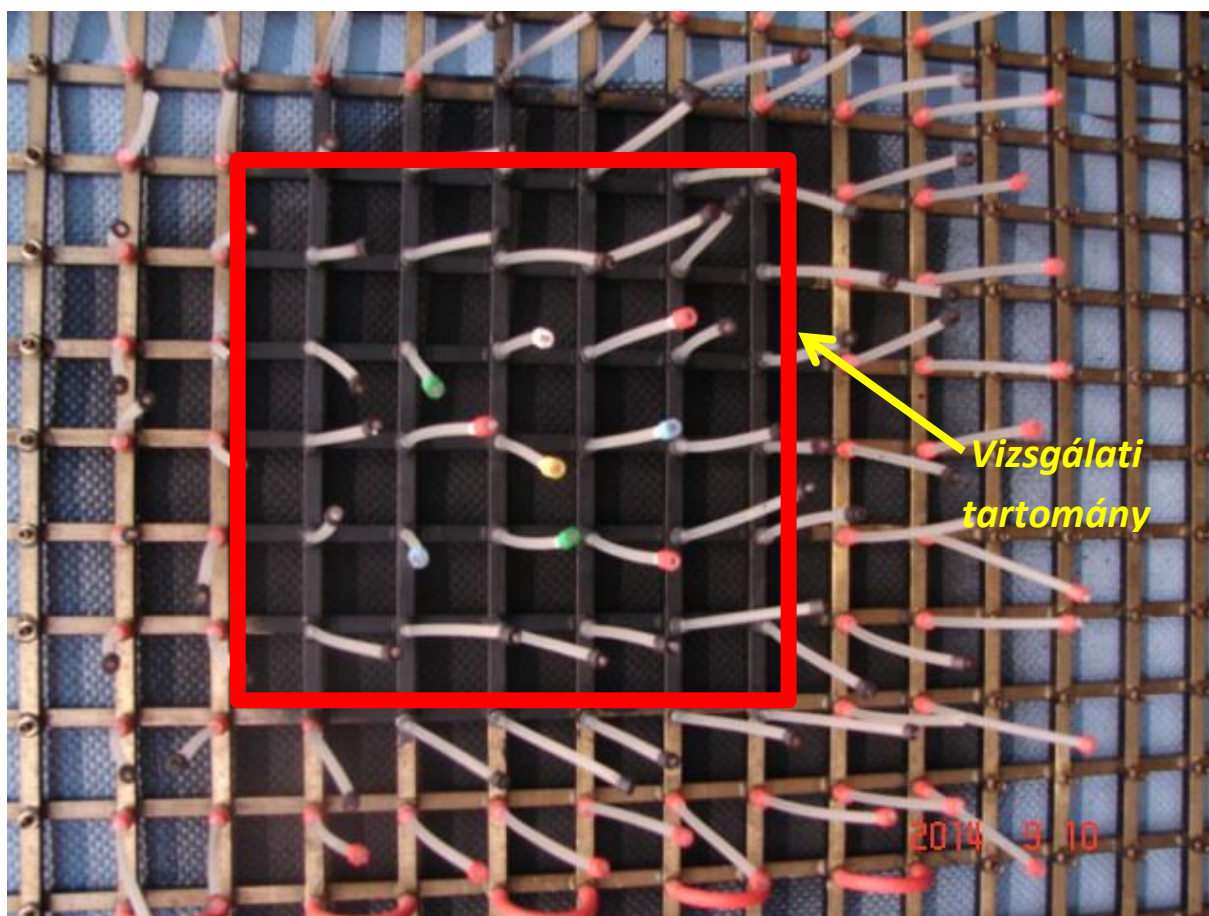
2.1.2. A mozgóelemek funkciói

A korábbi kutatások célja az volt, hogy a mozgó elemek legkedvezőbb geometriai tulajdonságait meghatározzák. A munka végén arra a következtetésre jutottak, hogy a jelenlegi feladatra a legmegfelelőbb anyag a szilikon, amelynek szilárdsági tulajdonságaiból következően kicsi az alakváltozással szembeni ellenállása. E szilikonból készült csöveknek a rádspontokba való rögzítésére 4 mm hosszúságú gumiból készült csövecskéket alkalmaztak, így a szilikon elemek teljes hossza 59 mm-re adódott, mivel azok legoptimálisabb aktív (mozgásban részt vevő) méretét 55 mm-ben állapították meg. (Szaszák, 2011)

E mozgó elemek a kompresszor által biztosított, belőlük nagysebességgel kilépő levegő hatására mozgásba jönnek. Az első mérések során azonban kiderült, hogy a mozgás elindításának nagy az energiaigénye, így ha a kompresszor által biztosított levegő nyomása relatíve alacsony, nem jön létre mozgás. Azonban a cél az volt, hogy a folyamat minél kisebb nyomás esetén elkezdődjön. Ezt úgy oldották meg, hogy a szilikoncsövek végére – ugyancsak gumiból készült, 4 mm hosszúságú – szűkítőelemeket helyeztek, amelyek növelték az egyes szilikoncsövecskék kiegyensúlyozatlan tömegének mértékét, így nagyobb lett ezek tehetetlensége, tehát kisebb energia befektetésével is mozgásba hozhatók a szilikoncsövek.

2.1.3. A rácsban lévő aktív elemek mérésének előkészítése

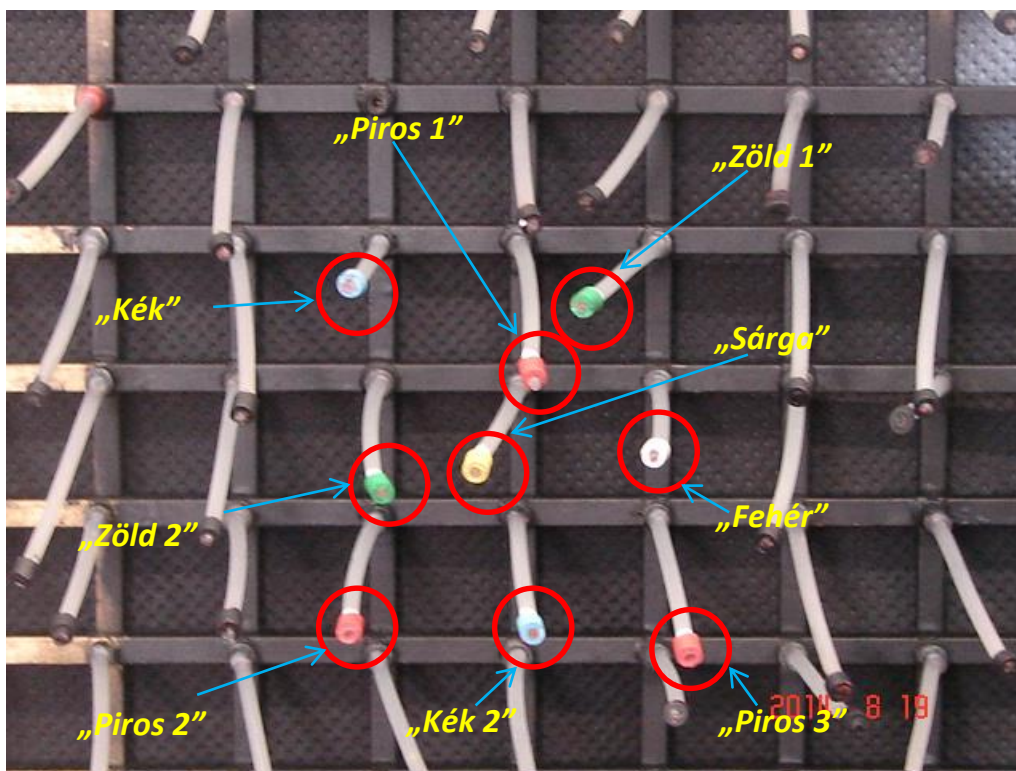
Amennyiben a rács teljes felületén elhelyezkedő szilikoncsövek mindegyikének mozgását vizsgálnánk – ami 11×10 darabot jelentene –, a feladat rendkívül bonyolulttá válna. Ebből kifolyólag egy kisebb terület (vizsgálati tartomány) definiálása vált szükségessé. A mozgás jellegének vizsgálatához kilenc elem követése elegendőnek bizonyult, amelyek $2 M$ oldalhosszúságú négyzetnek megfelelő területen helyezkednek el. Ha a vizsgálati tartományt $2 M \times 2 M$ nagyságúra választanánk, akkor a definiált terület szélén elhelyezkedő mozgó elemek számos esetben kilógnának a képből, azok mozgás során érintett pályájuk miatt. Mivel a csövek hossza hozzávetőlegesen $2 M$, így a mozgás során a csővégek lehetséges előfordulásai a rögzítési ponttól számított $2 M$ sugarú körön belül lehetnek, vagyis ha a vizsgálati tartományt minden irányban $2 M$ -mel megnövelnénk, akkor nagy valószínűséggel minden elem a definiált tartományon belül lenne. Ebből kifolyólag azt a területet, amelyről a felvételeket készítettem $6 M \times 6 M$ -nek választottam, amelyet a kamera pozíciójának beállításánál kellett figyelembe venni.



2.4. Ábra: A vizsgálati tartomány

Az egyik további probléma – amelynek megoldása még a felvételkedés előtt szükséges volt –, hogy a csöveket úgy kellett előkészíteni, hogy azok végeinek mozgását a képrögzítést követően a megírt algoritmus követni tudja. Mivel egy képen található pixelek színei pontosan definiálhatók, így kézenfekvő megoldásnak bizonyult, hogy a mozgó részek végén elhelyezkedő csövecskéket beszínezzem.

E metodikát egy korábbi munka alkalmával dolgozták ki, amely során egy adott mozgóelem követése volt a cél. A feladatot úgy oldották meg, hogy a képeken detektálni kívánt cső végét befestették egy olyan színre, amely a háttértől könnyen megkülönböztethető volt, a képen látható többi elemet pedig a háttérhez hasonló színűre festették. Mivel a csövek mögötti rács sötét volt, így egy világos árnyalat (piros) alkalmazása volt célravezető. Ebből a megfontolásból kiindulva az első ötlet az volt, hogy három, egymástól különböző színt alkalmazzak, azonban nem lett volna olyan lehetséges elrendezés, amelyben ne lett volna két egyforma színű csővég egymás szomszédságában. Ez viszont nehézséget okozott volna a feldolgozó algoritmusban. Ebből kifolyólag alaposan át kellett gondolni, hogy hány különböző árnyalat alkalmazása szükséges. Fontos volt a korábban említett szempont, hogy a háttértől megkülönböztethető színek legyenek, illetve az is, hogy az egyes árnyalatok se legyenek összetéveszthetők a képfeldolgozás során. Az alapvető ötlet az volt, hogy a követendő csővégek számánál kevesebb színt alkalmazzunk azért, mert kilenc egymástól szignifikánsan különböző árnyalat előállítása meglehetősen nehézkes. Ebből kifolyólag ennél a mérésnél *piros, sárga, fehér, zöld és kék* színt alkalmaztam, amelyek közül a zöldből és kéből kettőt-kettőt, valamint pirosból hármat helyeztünk el a rácson.



2.4. Ábra: A mérés során alkalmazott rácselrendezés

Ahogy azt korábban említettem, a szilikonsövek végén lévő elemek a mozgást nagymértékben befolyásolják, ezért tömegüket a vizsgálatok előtt feltétlen meg kellett mérni. A későbbi vizsgálatokat előkészítve az egyes színekből nem egy, hanem öt darabot készítettem elő, amely adatokat az alábbi táblázat foglalja össze. Ahogy az látható, a táblázat két adatot tartalmaz színenként: az első, a minta tömege a festés előtt, a másik pedig a festés utáni tömeg.

2.1. Táblázat: A rácselrendezésben alkalmazott csövecskék tömegértékei (m_1 – tömegérték a festés előtt, m_2 – tömegérték a festés után)

	tömeg [mg]	1.minta	2.minta	3.minta	4.minta	5.minta
KÉK	m_1	44,4	50,1	48,6	47,7	46,9
	m_2	48,2	52,6	53,1	51,4	53,2
ZÖLD	m_1	46,7	48,3	47,6	53	51,3
	m_2	51	52,4	49,7	55,3	54
SÁRGA	m_1	51,3	54,4	51,2	44,7	48,8
	m_2	62,6	59,6	58,8	51,4	55,9
PIROS	m_1	47,5	50,8	51,8	52,9	50,6
	m_2	47,5	50,8	51,8	52,9	50,6
FEHÉR	m_1	48,4	53,1	48,8	48,8	47,1
	m_2	55,6	62	56,1	55,3	53,9

2.2. A nagysebességű kamera és a hozzá tartozó berendezések

E mérőrendszerek túlnyomó többségéhez szükség vagy egy számítógépre és az arra feltelepített megfelelő képfeldolgozó szoftverre. Méréseim során LaVision termékekkel dolgoztam. Ezeknek nagy része a DaVis nevű szoftvert használja, amely képes az egyes eszközök paramétereinek (expozíciós idő, felbontás) illetve a képrögzítés részleteinek beállítására (például képrögzítési frekvencia).

2.2.1. A CMOS kamera

Napjainkban a nagysebességű kamerákat kétféle chippel: CCD és CMOS chippel gyártják. Mint ahogy a korszerű mérés technikák mindegyike, úgy ezek is a mérendő fizikai jelet elektronokká – feszültségjellé – alakítják, amelyek feldolgozása jóval egyszerűbb. Ezt a konverziót mátrixban elhelyezett fotodiódák hajtják végre. A méréseink során CMOS chippel ellátott *ImagerPro HS4M* típusú kamerát alkalmaztunk (2.5. Ábra), amely a LaVision egyik újfejlesztésű műszere. Ezeknek az eszközöknek két jellemző paraméterük van: a felbontás, amely megmutatja a képeken található pixelek számát, illetve az expozíciós idő, amely a vizsgálható folyamatok hozható egyértelmű összefüggésbe. A két jellemző közül a fizikai megvalósítás miatt a felbontás rendelkezik egy felső határral, amelyet nem lehet túllépni. Ennél a típusnál a felbontás felső limitje – amelynek a kamera memóriája szab határt – 2016×2016 pixel, amely korlátozza a felvehető képek számának, amely jelen esetben 3140 (LaVision, 2014). Amennyiben csökkentjük a kép méretét, a rögzíthető képek száma megnő. A mérések során szükségesek voltak a jó minőségű felvételek, így kihasználtuk a kamera által biztosított maximális értéket. Továbbá tapasztalatok alapján az expozíciós időt $300 \mu s$ -ra választottuk, ugyanis ebben az esetben a felvételek nem voltak elmosódottak, az alakzatok tökéletesen kivehetők voltak.



2.5.Ábra: Az ImagerPro HS4M típusú nagysebességű kamera

Továbbá e típus rendelkezik egyéb minőséget javító módszerekkel is, úgy mint a „Dark image subtraction” (sötét kép kivonása). Az eljárás lényege, hogy a felvételsorozat előtt a kamera, lefedett lencsékkel felvételt készít, ami nyilván fekete színű lesz. Majd ezt a képet tárolja és a képrögzítés közben az aktuális képekből kivonja a sötétet, ezzel világosabbá téve azokat.

2.2.2. Az optika

Ahhoz, hogy megfelelő minőségű képeket készíthessünk, megfelelő kamera-beállítások mellett precíz optika is szükséges. A jelenlegi mérések során egy *AF Micro-Nikkor 105 mm f/2.8 D* típusú lencsét alkalmaztam, ahol a *105 mm* a lencse fókusz távolsága, az *f/2.8* pedig egy, az optikára jellemző szám, amit, *f*-számnak neveztek el (külföldi szakirodalom szerint *f-number*). Általánosságban az *f/x* arány kapcsolatát teremti a fókusz távolság és a blende effektív átmérője között, ahol az *x* érték manuális fókuszálás esetén, a lencse oldalán lévő skáláról leolvasható, ahogy azt az alábbi ábrán látni lehet. Amennyiben ezt az értéket csökkentjük, a blende egyre zártabb lesz, a kép pedig egyre sötétebb, ha pedig növeljük *x* értékét, a kép egyre világosabb lesz, mert a fény nagyobb átmérőjű blendén jut be az optikába.



2.6. Ábra Az AF Micro-Nikkor 105 mm f/2.8 D típusú lencse (AF, 2014)

2.3. A triggerer

A nagysebességű mérőrendszerek túlnyomó többségében szükséges a triggerelés, amit például egy külső frekvencia és egy, a mérőeszközre jellemző frekvencia összehangolására – szinkronizálására – használnak. Az imént említett művelet tulajdonképpen elektromos impulzusok sorozata, amely az adott eszköznek információt ad a folyamat kezdetének időpillanatáról. Ezt a feladatot egy vezérlő berendezés, az úgynevezett triggerer (angol szakirodalomban *high speed controller*) látja el, aminek egy speciális típusa az alábbi ábrán látható. Esetünkben a kamerának a képrögzítési frekvenciáját a turbulenciagenerátorban lévő elemek mozgásának sebességéhez igazítottuk, így biztosítottuk az egyes felvételek közötti néhány pixeles csővég-elmozdulásokat.



2.7. Ábra. A triggerer

E berendezést egy #1007818 típusú csatlakozón keresztül kötöttem össze a nagysebességű kamerával, amelynek „Acq trig” bemenetére egy nagy frekvenciájú, úgynevezett ’státuszjel’; másik, „Exp trig” elnevezésű csatlakozási pontjára pedig egy kisfrekvenciájú vezérlőjelet kötöttem. A triggerer kimeneti jellemzői között az a kapcsolat, hogy a vezérlőjel kijelöli azt az időintervallumot, amelyen belül a képek felvétele fog történni, amelyet más néven „körnek” szokás mondani. A státuszjel pedig megmondja, hogy ezen belül milyen gyakorisággal történjen a képek rögzítése, vagyis, hogy két kép között mennyi idő teljen el. Ezeket paraméterszerűen a DaVis-ban be kell állítani: ’Image rate’ alatt a státuszjel frekvenciáját, ’Cycle rate’ alatt pedig a vezérlőjel frekvenciája adható meg. Ügyelni kell azonban arra, hogy a vezérlőjelnek minden esetben nagyobbak kell lennie, ellenkező esetben megtörténhetne az, hogy egy körön belül egyetlen kép sem kerül rögzítésre. A mérések során 1000 képet vettem fel 1 kHz-es ’Image rate’-tel és 0.5 Hz-es ’Cycle rate’ frekvenciával. A rögzítés ebben az esetben 1 s-ig, azonban egy kör 2 s-ig tartott, tehát az utolsó kép felvétele és egy új kör kezdete között pontosan 1 s telt el. Vagyis elmondható, hogy ha a körök számát kétszerezem és egy kör alatt 500 képet szándékoznánk felvenni, akkor az első kör utolsó képe és az új kör első képe között idő telne el, amelyen belül nem történne képrögzítés. Ez egy előnyös módszer, ugyanis nagysebességű rendszerek esetén 0.5 s alatt a vizsgált paraméterek (például sebesség, frekvencia, pozíció) akár nagymértékben is megváltozhatnak. Tehát a nagysebességű mérés technikában a képek felvételének ilyen módon történő időbeli eltolása gyakran alkalmazott, azonban az én esetemben a képek egy kör alatt kerültek rögzítésre.

2.4. Reflektorelrendezés

Olyan rendszereknél, ahol a vizsgált objektumok nagy sebességgel mozognak, nem elegendő a rendszerről másodpercenként felvételeket készíteni, mert a mozgásviszonyok ennyi idő elteltével teljesen megváltozhatnak. Ilyen esetekben a képek rögzítésének frekvenciája kHz nagyságrendben van, tehát két kép között eltelt időt ms-okban mérjük. Mivel ilyenkor a fényérzékelő chip-re csak nagyon rövid ideig jut fény, így ahhoz, hogy a kép fényereje megfelelő legyen, nagy teljesítményű lámpákat alkalmazunk, amelyeket a megvilágítási területük alapján két csoportba sorolhatunk. Az egyik csoportba a négy darab ’Dedocal’ gyártójú világító eszközök tartoztak, amelyek által biztosított fénysugarak keskenyek és relatíve gyengék voltak (az általuk leadott hő viszonylag kicsi volt), tehát csak kis terület megvilágítására alkalmasak. Tapasztalatok alapján ezek a területek a vizsgálati tartomány sarokpontjai voltak. Azonban, mivel a szilikonszövek folyamatos mozgásban vannak, így

fontos az is, hogy a vizsgálati tartomány teljes területét megvilágítsuk. Ezt a feladatot egy halogén lámpa látta el, amelynek fényereje rendkívül nagy volt, ebből következően csak nagy területek bevilágítására volt alkalmas, nagy hőteljesítménye miatt. Ezeket a világító eszközöket az alábbi ábra szemlélteti.



a.)



b.)

2.8. Ábra: A mérések során alkalmazott reflektorok

a.) Halogén reflektor

b.) "Dedocal" típusú reflektor

3. EREDMÉNYEK

3.1. *Képfeldolgozás alapjai*

A digitális kép kifejezés arra utal, hogy a felvétel meghatározott – véges – számú elemből áll, amit pixelnek nevezünk, és az egyes pixelek csak bizonyos értékeket vehetnek fel. Matematikailag, egy kép általánosan három darab (**R**ed, **G**reen és **B**lue) kétváltozós függvény ($f=f(x,y)$) segítségével definiálható, amelyekben változóként (x,y) a hely két koordinátája szerepelnek. Egy adott (x,y) helyen pedig a kép úgynevezett intenzitása foglal helyet. Matematikailag, ha egy függvény véges számú pontokat tartalmaz, akkor ez egy adatstruktúrába – kétdimenziós tömbbe, mátrixba – foglalható, amely pontosan a kép méretével megegyező méretű, tehát egy $M \times N$ nagyságú kép egy $M \times N$ -es mátrixszal ekvivalens. Az imént említett adatstruktúra alapján a felvételeket két csoportba oszthatjuk: monokróm és színes képek csoportjába. A kettejük között az alapvető különbség az, hogy a fekete-fehér képek egyetlen kétdimenziós mátrixszal írhatók le, míg a színes képek esetén számolnunk kell az egyes képpontok RGB színskombinációjával is, amely az adatstruktúra harmadik dimenzióját jelenti. Ebből kifolyólag egy adott képpont színét könnyűszerrel tudjuk definiálni, amelyet a képfeldolgozási algoritmus során sokszor alkalmaztam. (Gonzalez, 2009)

További fontos tényező, amely ismerete nélkülözhetetlen a pontos pozíciók megadásakor, a mátrixok indexelése. Erre a szakirodalom két lehetőséget biztosít. Az egyik, hogy az elemek számozása a $(0; 0)$ pontból indul, ekkor az utolsó elem az $(M; N)$ pozícióban lesz, a másik esetben pedig a számozás az $(1;1)$ pontból indul és az $(M+1; N+1)$ pontban ér véget, amennyiben a kép $M \times N$ képpont méretű. Ennek megállapítása többnyire konvención alapul. Az általam alkalmazott MATLAB szoftver a második indexelési formát alkalmazza, tehát a pozíciók kiszámításához ezt figyelembe kellett venni.

A képnek egy másik fontos tulajdonsága – a méretén túl – az adattípus, amely lehet például double, uint8 vagy uint16, ahol a 'uint' mögötti szám a bitszámot jelenti. Ez megmondja, hogy egy képen hányféle szín kódolása lehetséges. Például egy uint8 típusú kép nyolc bites, tehát az intenzitásának maximuma 255 lehet, míg a uint16 típusú képnek 65535. Látható, hogy a két adattípus között nagyságrendbeli különbség van, ami nyilvánvalóan pontosságbeli különbségekhez vezet. A készített felvételek mindegyike színes és uint8 típusú, tehát az intenzitás mindhárom dimenzióan belül 255 különböző érték lehet.

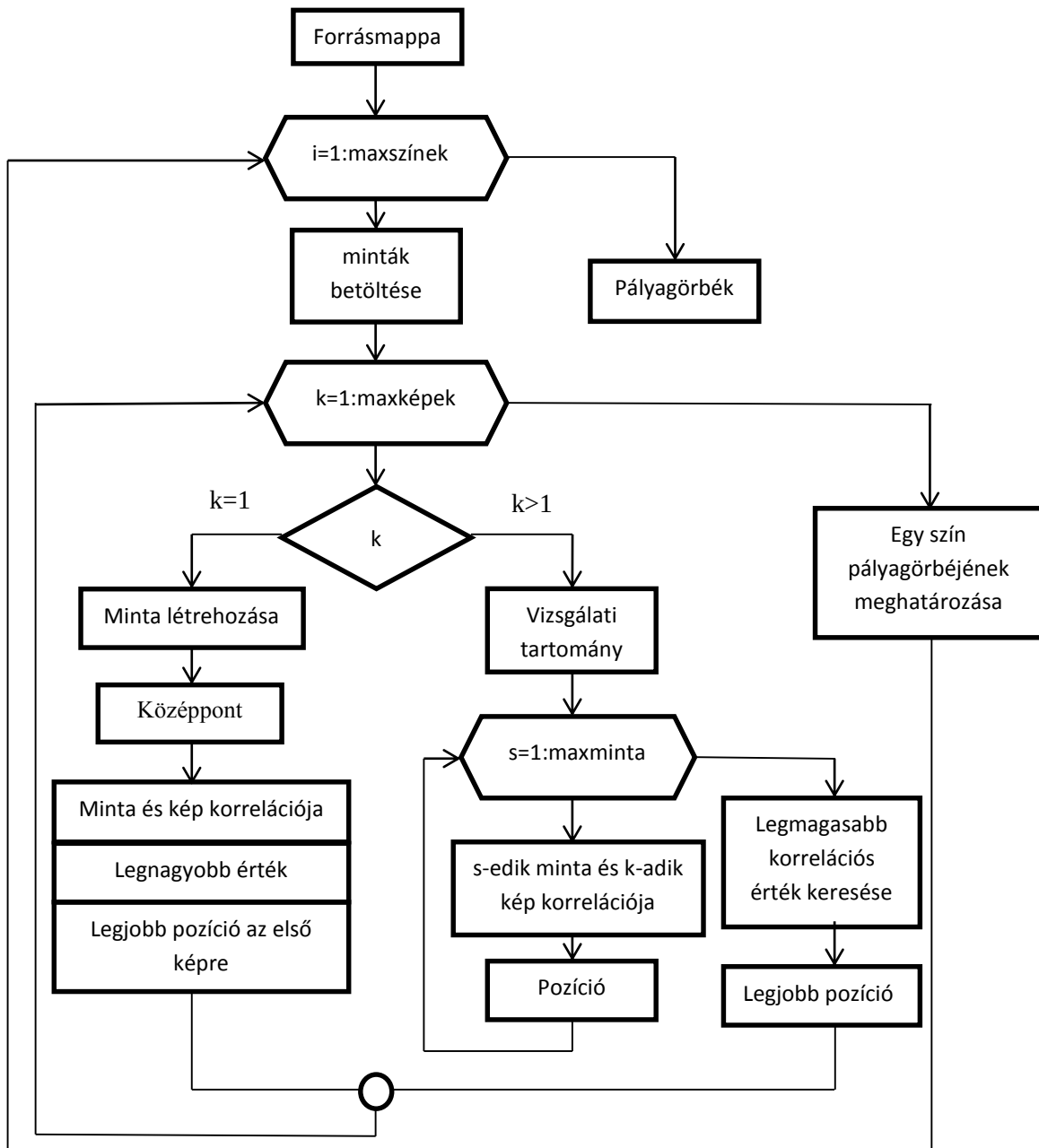
3.2. *Az algoritmus ismertetése*

Az imént ismertetett elméleti alapokból kiindulva felépíthető egy olyan struktúra, amely a csővégeket a rajtuk lévő csövecske színe alapján követi. Ez úgy valósítható meg, hogy felállítjuk az egyes árnyalatok definícióit, majd megvizsgáljuk, hogy az adott kép mely képpontjai felelnek ennek meg. Ebből egy logikai mátrixot készítünk, amelyben az 1-es érték jelenti azt, hogy az adott pixel a feltételnek megfelel, a 0 érték pedig, hogy nem. Majd megkeressük azt a területet, ahol az 1-es értékek sűrűsége a legnagyobb, így ez lesz a szilikoncső pozíciója az adott képen. Ezt az algoritmust korábban megírtuk, azonban rendelkezik olyan tulajdonságokkal, amely számunkra kedvezőtlen. Ezek közé tartozik az, hogy mivel egy színhalmaz középpontját keresi, és mivel a csövek mozgásban vannak, ezért a szín definícióját kielégítő pixelek száma képről képre változik – mert a csövek állásszöge is változik –, aminek hatására a középpont helyzete is módosul, tehát az algoritmus nem egy konkrét, definiált pontot követ (3.1. Ábra). Mivel a programmal szemben az az alapvető elvárásunk, hogy a mozgórészek elhelyezett szűkítőelemek középpontját kövesse, így egy olyan algoritmus megírása vált szükségessé, ami ennek alapján sokkal érzékenyebb a mozgóelemek állásszögére.



3.1. Ábra A korábban megírt algoritmus által szolgáltatott eredmény a csövecske pozícióját illetően

Az a matematikai művelet, amely alkalmas két kép összehasonlítására, a keresztkorreláció - illetve annak egy speciális változata, a normalizált keresztkorreláció-, aminek végeredménye egy egynél kisebb szám, a korrelációs együttható. Ez megmutatja, hogy a két kép mennyiben hasonlít egymáshoz. Ezt kihasználva írtam egy másik algoritmust, amelynek struktúrája az alábbi ábrán látható. A következő alfejezetekben ennek működését illetve a különböző hibakezelési eljárásokat fogom részleteiben tárgyalni.



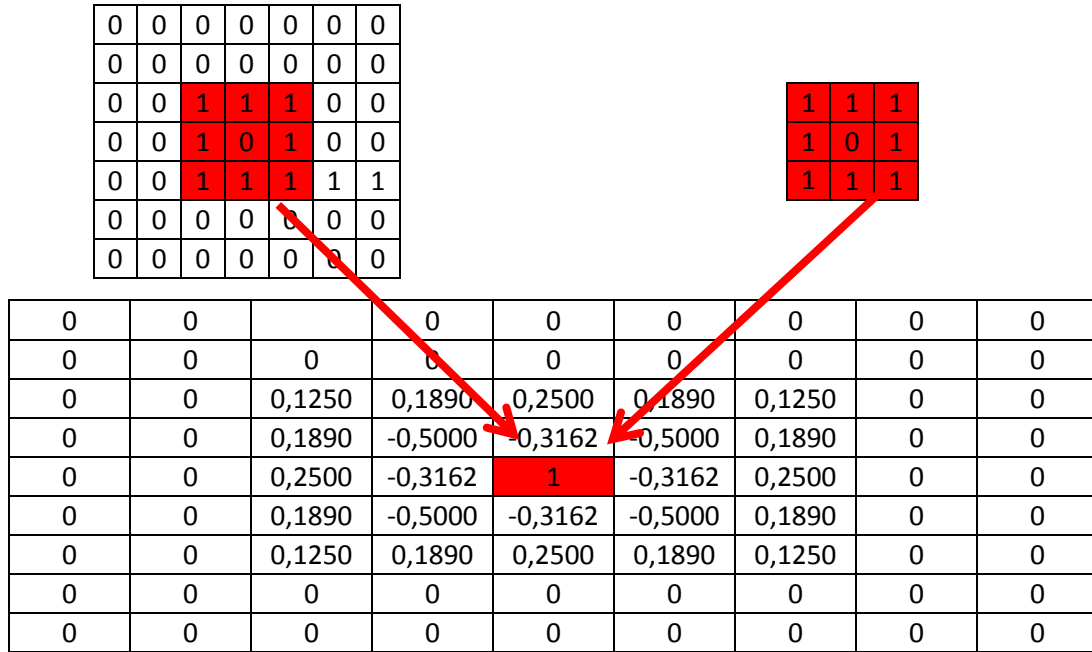
3.2. Ábra: Az algoritmus működésének strukturavázlata

3.2.1. A keresztkorreláció alkalmazása

A korreláció, mint matematikai műveletet, a kép- illetve jelfeldolgozásban egyaránt gyakran alkalmazott két különböző kép vagy jel, egy jel önmagával való összehasonlítására. Ennek alapján két fő típusa van: a keresztkorreláció, ami két különböző adathalmazt hasonlít össze; és autokorreláció, amely egy adathalmazt önmagával vet össze. Ebben a feladatban egy speciális típust, az úgynevezett normalizált keresztkorrelációt alkalmaztam. A művelet célja, hogy egy adott képen egy meghatározott alakkal rendelkező forma pozícióját megtaláljuk. Ezt az alakot egy mátrix definiálja és a szakirodalom mintának (template/sample) nevezi. Ebből következően két bemeneti paramétere van: a vizsgált kép és a keresni kívánt minta.

Ahhoz, hogy megértsük a működését, az imént említett képek definiálása szükséges. Legyen a vizsgálni kívánt felvétel $M_x \times M_y$ méretű, illetve a minta nagysága $t_x \times t_y$. Az első lépés az, hogy a mintát a kiinduló helyzetébe helyezzük, amely a vizsgált kép első képpontja, majd innen pixelenként lépkedve az összes képpont korrelációs együtthatóját kiszámítsuk a szakirodalomban (Gonzalez, 2009) megadott összefüggés alapján. Ezekből egy harmadik adathalmazt, az úgynevezett korrelációmátrixot hozunk létre, amelynek értékei -1 és 1 között fordulhatnak elő, ahol 1 jelenti a tökéletes-, -1 pedig az inverz egyezőséget. A mátrixban előfordulhat 0 is, amely azt reprezentálja, hogy a két vizsgált mátrix között az adott pontban semmilyen lineáris kapcsolat nem mutatható ki. A MATLAB programrendszerben egy t minta és egy f kép normalizált keresztkorrelációja a $CORR=normxcorr2(t,f)$ beépített függvény alkalmazásával számítható ki.

Erre a műveletre egy példát az alábbi ábra mutat, amelynek bal oldalán látható a vizsgálni kívánt mátrix, jobb oldalán pedig az a minta, aminek a pozícióját keressük.



3.3. Ábra: A normalizált keresztkorreláció működésének szemléltetése

Az ábra alsó részén a korrelációmátrix helyezkedik el, amelynek méretét az alábbi összefüggések alapján számíthatjuk ki.

$$CORR_x = M_x + t_x - 1$$

$$CORR_y = M_y + t_y - 1$$
(3.1)

ahol $CORR_x$ a korrelációmátrix vízszintes- illetve $CORR_y$ annak függőlege irányú mérete. Látható, hogy a mátrix elemei közül a legnagyobb az 1-es érték, amely azt jelent, hogy a kép és a minta között ebben a pontban a legnagyobb, 100%-os az egyezés. Abban az esetben, ha a kép egy adott pontjának koordinátáit szeretnénk meghatározni, akkor a minta/minták készítésére különös hangsúlyt kell fektetnünk. Ezzel a folyamattal a következő alfejezet foglalkozik.

3.2.2. Minták készítése

A normalizált keresztkorreláció alkalmazásához több szempont szerint megfelelő minták készítése szükséges, amelyre példát az alábbi ábra mutat.



3.4. Ábra: Példa egy helyesnek vélt mintára

Számunkra a legkedvezőbb az lenne, ha az imént említett korrelációmátrix legnagyobb eleme 1 lenne, amely azt jelentené, hogy az adott pontban a két bemenő paraméter tökéletes egyezőséget mutat, tehát a cső pozíciója ennek két koordinátájából könnyen számítható. Azonban ez csak akkor teljesül, ha a minta az adott kép részlete, vagyis ha ezeket minden egyes korrelációs lépéshez külön-külön elkészítenénk, tehát a képek számával megegyező mennyiségű minta állna rendelkezésünkre. Ilyen módon a feladat megoldása tökéletes lenne, azonban a hatalmas adatmennyiség (mérésenként háromezer felvétel) miatt ez rendkívül időigényes. Tehát kérdésként merülhet fel, hogy mennyi a megfelelő eredmények eléréséhez szükséges minták száma illetve, hogy a végeredmény csak a képeken lévő csővégek alakjától vagy esetleg a színüktől is függ.

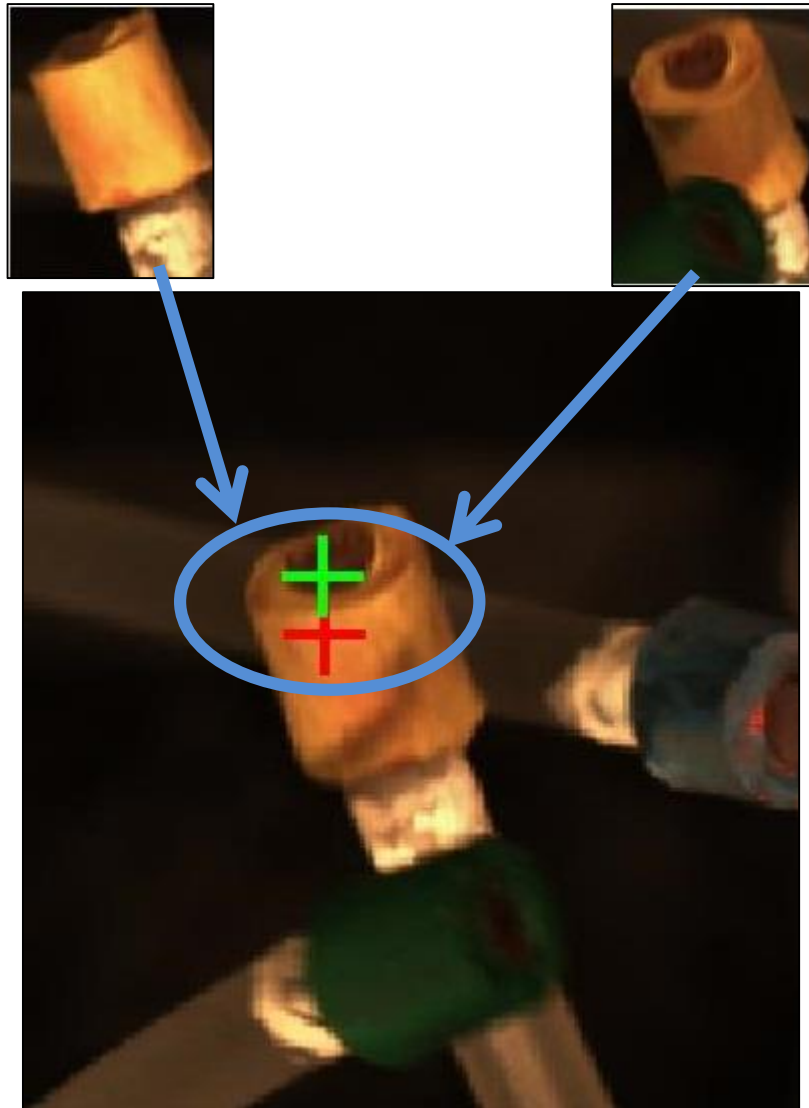
A programban először egyszerűsége törekedtem, tehát a képfeldolgozás során egyetlen mintahalmazt használtam, amely elkészítésénél figyelmen kívül hagytam azok színét, csak az állásszöget vettem figyelembe. Ebből következően az alkalmazott minták között különböző színű csővégek is helyet foglaltak. Azonban az egyes korrelációs lépések során az eredményül kapott mátrixokban lévő elemek maximumai rendkívül alacsonyak voltak ($\text{corrcoeff} < 0,5$), tehát a pozíciók egész biztos, hogy rossz helyre kerültek. Vagyis az imént feltett kérdésre a válasz az, hogy a korreláció végeredménye egészen bizonyos, hogy függ a vizsgált minta színétől, tehát pontosabb végeredmény – magasabb korrelációs együttható – érdekében a vizsgált csődarabok mindegyikére külön minta készítése szükséges.

Ennek első lépése, hogy a felvételek közül kiválasszunk olyan képeket, amelyeken elhelyezkedő csővecskék paraméterei megfelelnek az elvárásainknak. E jellemzők közé tartozik a csővég állásszöge – vagyis a csővecske középvonalának vízszintessel bezárt szöge – , nagysága illetve értéke. A szükséges állásszögeket vizsgálva az mondható el, hogy nyilvánvalóan a legkedvezőbb az lenne, ha a minták közötti szögbeli különbségek minél kisebbek lennének, de ennek egy határt kell szabni, ugyanis ez nagyszámú mintához vezetne. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a megfelelő eredmények eléréséhez összesen 16 állásszög szükséges (0, 90, 180, 270 és az egyes térszögekben 3-3). Azonban, ha a korrelációhoz 16 mintát használnánk csővégenként, az eredmény még mindig pontatlan lenne. Megfigyelhető, hogy a hatékonyságot az is befolyásolja, hogy a mozgóelemek milyen része(i) jelennek meg a felvételeken. Ugyanis abban az esetben, ha a csővég keresztmetszete és a palástja is látható (3.5. Ábra/b), akkor a csővecske közepén egy sötét folt észlelhető, ezért ezen a területen a kép intenzitása nagyban eltér az átlagostól, ami megkülönbözteti az adott mintát a többitől. Ha ezt figyelembe vesszük, akkor az alkalmazott minták három csoportba oszthatók: ahol a

keresztmetszet is látható (3.5. Ábra/b), ahol ez csak élben látszik (3.5. Ábra/c) és vannak olyan esetek, ahol a csövecske palástja nem, csupán a keresztmetszete látható a felvételen (3.5. Ábra/a). Ebből következően a minták száma 33-ra módosul csövecskékként: 16 minta, ahol a palást és a keresztmetszet is látható, 16 minta, ahol csak a palást látható illetve 1 minta, amely magát a keresztmetszetet tartalmazza.



A minták készítése során további fontos szempont, hogy ezek háttére sötét legyen, vagyis ne tartalmazzon egyéb csőszakaszt, vagy más festett csövecskét. Ugyanis ellenkező esetben a zavaró tényezők hatására a minta egyes képpontjaiban az intenzitás értéke megváltozik, és a korrelációmátrixot az algoritmus ezen intenzitásértékek felhasználásával számítja ki, amely téves eredményekhez vezet. Erre példát az alábbi ábra mutat, amelyen két különböző minta látható. Az egyik zavaró tényezőktől mentes, sötét háttérrel rendelkezik, míg a jobb oldali mintán megfigyelhető egy másik csövecske részlete is. A korrelációt mindkettejükkel elvégezve, az ábra alsó részén látható, hogy a zölddel jelzett pozíció jóval pontosabb, mint a pirossal jelzett hely. Ez a különbség megfigyelhető a korrelációs együtthatókban is, ugyanis az első esetben ez 87%-ra adódik, míg a másodikban csupán csak 75%.



3.6. Ábra: Különbség szemléltetése egy helyesen és egy rosszul megválasztott minta korrelációs végeredménye között

A programban ezek készítését a következő lépések alapján hajtottam végre: először a képek sorszámai alapján a feltételeknek megfelelő képeket betöltöttem, majd kivágtam belőlük az adott csövecskéket. Ezt követően kijelöltem – ugyancsak manuálisan – ezeknek a középpontjait. A megfelelő tárolás is lényeges, ugyanis a későbbiekben ezekre hivatkozni kell. Ezért e két jellemző tárolására egy kétszlopos adatstruktúrát hoztam létre, amelynek első oszlopa magát a képet, második oszlopa pedig ennek a középpontját tartalmazta.

3.2.3. A korreláció alkalmazása

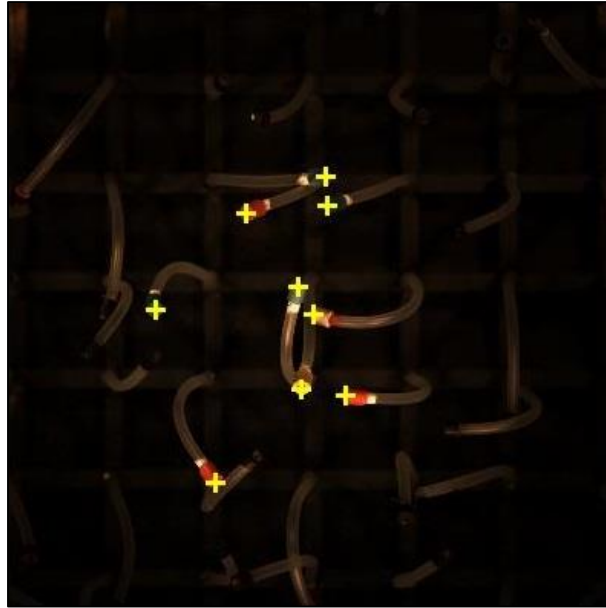
Ahogy azt korábban már említettem, a legegyszerűbb módja annak, hogy egy képen egy meghatározott alakkal rendelkező mintát keressünk, a normalizált keresztkorreláció alkalmazása. Fontos tudni, hogy ez a matematikai művelet csak kétdimenziós tömböket képes összehasonlítani, tehát színes képek esetében először meg kell határozni, hogy mely

színkomponensekkel végezzük el a korrelációt. Lehetőségként szolgál az is, hogy mindhárom színkomponenssel elvégezzük a műveletet, de nem követünk el túl nagy hibát, ha csak annak a komponensnek a korrelációmátrixát vesszük figyelembe, amelynek az adott mintán a legnagyobb az intenzitása – vagyis amelyik a legfényesebb. Például a piros szín legfényesebb komponense egyértelműen az első, míg a zöldnek a második komponens.

Ha a mérési elrendezésben egyféle színből több is szerepel, akkor a mozgóelemek színek alapján történő beazonosítása nehézkessé válik. Ebből kifolyólag az algoritmust, működése alapján két részre oszthatjuk: első lépésként a csövecskék pozícióját az első képen detektáljuk – ezzel tulajdonképpen meghatároztuk az egyes elemek mozgási területeit-. Ezt ugyancsak korrelációval hajtjuk végre úgy, hogy manuálisan a képen kijelöljük azokat a területeket, ahol az egyes mozgó elemek helyet foglalnak, ‘kivágjuk’ ezeket, majd kijelöljük a középpontjukat és végrehajtjuk a korrelációt a szóban forgó képpel. Érzékelhető, hogy a korrelációmátrixban egészen biztos, hogy lesz olyan pont, ahol az egyezés tökéletes, mert a műveletben használt minta az adott kép részlete. A pont detektálása inntől egyszerű: megkeressük azt a helyet, ahol a mátrix értéke 1, majd ennek koordinátaiból, az előző pontban ismerttetett méretbeli különbségek figyelembevételével és a középpont koordinátái segítségével kiszámítjuk a mozgóelem pozícióját ezen a képen. Ezt a kapcsolatot az alábbi egyenlet írja le:

$$\begin{aligned} p_x(1) &= -t_x + \max_x + C_x + 1 \\ p_y(1) &= -t_y + \max_y + C_y + 1 \end{aligned} \tag{3.2}$$

ahol $\max_x$ és $\max_y$ jelenti azt a helyet, ahol a korrelációmátrix értéke maximális illetve C_x és C_y a mozgóelem középpontjának koordinátái a mintán. A folyamat végeredménye az alábbi ábrán látható.



3.7. Ábra: Pozíciók meghatározása az első felvételen

Az elsőtől különböző képek esetében az eljárás menete részben megváltozik. Ezeknél a felvételeknél a korrelációban a korábban elkészített mintákat használtam, amelyeket egy forrásmappából töltöttem be. Ahhoz, hogy a műveletet az összes képen, minden mintával el lehessen végezni, két egymásba ágyazott 'for' ciklust alkalmaztam: az egyik a képek- a másik pedig a minták léptetéséért felelt. Abban az esetben, ha a műveletben a vizsgált kép teljes egészét használnám, a folyamat egyrészt meglehetősen időigényes lenne, másrészt pedig pontosságbeli eltérések is előfordulnának. Ebből következően egy olyan vizsgálati tartomány definiálása vált szükségessé, amely minden esetben tartalmazza a szóban forgó mozgóelemet. Ennek meghatározásához a csövek előző képen lévő pozícióját vettem alapul, ami a vizsgálati tartomány középpontjaként szolgál. Mivel ennek minden esetben tartalmaznia kell az adott mozgóelemet, így a nagyságának meghatározása nagyon fontos volt. Érzékelhető, hogy ezt nagyban befolyásolja ezek sebessége, amit mivel nem ismerünk, ezért a tartomány nagyságát tapasztalati úton tudtam meghatározni, aminek következtében ennek nagysága *150x150 pixel* méretűre adódott. Ezt követően az említett beépített függvény segítségével a program végrehajtotta a korrelációt valamennyi mintával, és a korrelációmátrixból kiválasztotta a legnagyobb elemet, majd az alábbi összefüggések segítségével kiszámította az adott mintához tartozó pozíciót.

$$p_x(n) = p_x(n-1) - \frac{w}{2} - t_x + \max_x + C_x + 1$$

$$p_y(n) = p_y(n-1) - \frac{h}{2} - t_y + \max_y + C_y + 1$$
(3.3.)

A különbség a korábban említett eljárásnál ismertetett összefüggéssel szemben az, hogy itt már figyelembe kellett venni a minta előző képen lévő pozícióját, amelyet a $p_x(n-1)$ tag jelöl, illetve a vizsgálati tartomány nagyságát is, amelynek magassága h illetve szélessége w . Ezt a folyamatot az algoritmus minden egyes mintával elvégezte, amelyek a lehetséges pozíciókként szolgálnak. Az utolsó lépés az volt, hogy kiválasszam azt az x és y koordinátát, amely pontosan a keresett csővecske helyzetét jelöli. Ennek legkönnyebb módja az, hogy megvizsgáljuk, a korrelációmátrixok maximális eleme mely minta esetében a legnagyobb: amelyik mintánál ez teljesül annak a pozíciója közelíti legjobban meg a csőszakasz aktuális helyzetét. Az alábbi ábra szemlélteti a végeredményül kapott pontokat, amelyek közül a piros színnel jelölt a legmegfelelőbb.

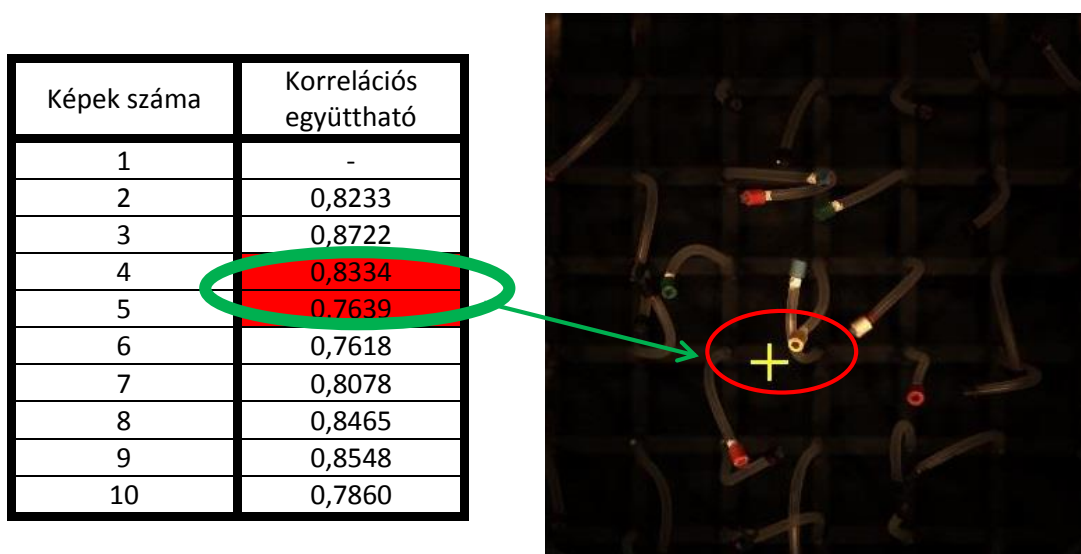


3.8. Ábra: A korreláció eredményei egy adott képen

3.2.4. Hibakezelési eljárások

Az alábbi ábrán megfigyelhető, hogy vannak olyan esetek, amikor a mozgóelemek helymeghatározásánál problémák adódnak. Az nyilvánvaló, hogy ezekben az esetekben a korrelációs együttható értéke alacsony, azonban ezért a hibáért nem egyedül ennek megjelenése

felel, ugyanis vannak olyan esetek, amikor ez az érték alacsony, de a pont helyzete megfelelő. Tehát egy olyan határérték meghatározása, amely alatt az algoritmus hibát követ el szinte lehetetlen. Tételezzük fel, hogy az vizsgált kép, ahol a hiba megjelenik, a k -adik felvétel. Megfigyelhető, hogy a k -adik és a $(k-1)$ -edik kép korrelációs együtthatója közötti különbség mértéke nagyra adódik, amely az ábra bal oldalán lévő táblázatban látható. Ebben az esetben ez az érték 7% volt. Megfigyelhető azonban, hogy a 9-10-es kép esetén is a korrelációs együtthatók közötti eltérés nagyobbra adódik, mint 7%, azonban ekkor már az algoritmus nem követte a csövecskét, tehát ennek megjelenése nem köthető egy hiba megjelenéséhez.



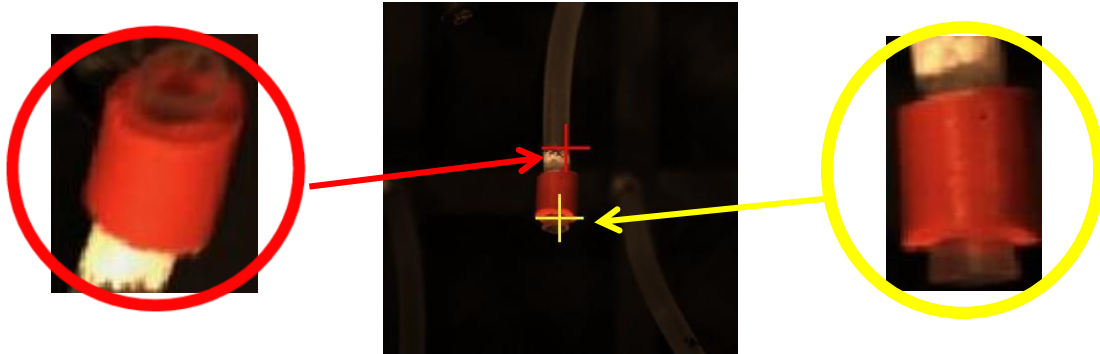
a.)
3.9. Ábra: Hiba megjelenése a pozíciók meghatározásában
a.) Korrelációs együtthatókat tartalmazó táblázat
b.) Hiba szemléltetése egy adott képen

Az első feltételezések szerint a hibákért ez felelt, és ahol ez megjelent, ott a középpont manuális kijelölése vált szükségessé. Azonban e korrekciós mechanizmus nem dolgozott jó hatásfokkal, mert ott is észlelt hibát, ahol a pozíció helyes volt. Tehát ebből következően a problémáknak más forrása volt. Alapvetően az alkalmazott hibakezelési eljárásokat a problémák forrása alapján két csoportba sorolhatjuk: az első csoport az, ahol a hibákat a helytelenül kiválasztott minta okozza, a másik pedig az, amit az egyes, helyesnek vélt pozíciók közötti nagy térbeli különbség vált ki. A következő két alfejezetben az ezekre vonatkozó hibakezelési eljárásokat fogom részleteiben ismertetni.

3.2.4.1. A helytelenül megválasztott minták okozta hiba javítása

Megfigyelhető, hogy a program által helyesnek vélt pozíció néha a csövecske áttelleges végén helyezkedik el. Ezt az okozza, hogy az algoritmus valami okból kifolyólag ellentétes állásszögű

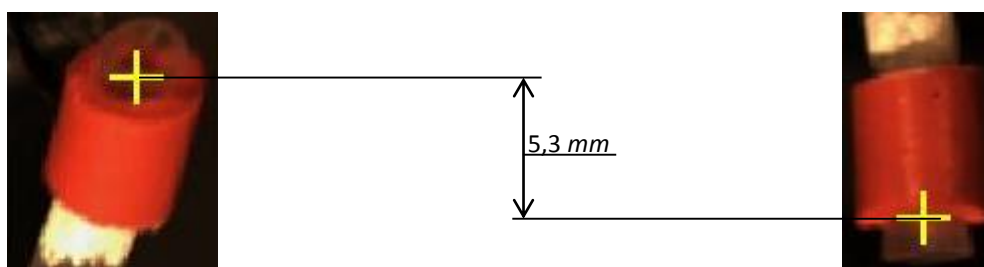
mintát vél helyesnek. Az ábrán látható esetben a helyesnek vélt minta állásszöge a vízszintes síkkal 90° -os szöget zár be, míg a csövecske állásszöge valójában 270° -os. A cél az, hogy programozási úton megtaláljuk azt a mintát, amely helyes végeredményt szolgáltat, azonban nehézséget okoz az, hogy ennek a korrelációs együtthatója a maximálisnál alacsonyabb.



3.10. Ábra: Hiba a rosszul kiválasztott mintákból kifolyólag

A hiba javításához figyelembe kell venni, hogy egy ilyen lépés megtétele fizikailag is lehetetlen, mivel sem az áramlás átlagsebessége sem pedig az egyes elemek ütközése nem tud olyan hatást kiváltani, hogy a csőszakasz állásszöge ilyen mértékben megváltozzon 1-1 kép között. Ebből következően a program egy feltételt szab arra vonatkozóan, hogy amennyiben az adott csövecske két szomszédos képen lévő pozícióinak meghatározásához használt minták állásszögeinek különbsége egy bizonyos értéket meghalad, a program beavatkozik. Azonban nehézséget okoz a szögek definiálása, mivel a mintákat tartalmazó adatstruktúra csak ezek mátrixát és a középpontjuk koordinátáit tartalmazza, így a vízszintessel bezárt szögről gyakorlatilag semmi információnk nincs. Azonban megfigyelhető, hogy két ellentétes állásszögű minták középpontjai nagyban eltérnek egymástól – az egyik a kép felső, míg a másik a kép alsó részében helyezkedik el – ahogy azt az alábbi ábra szemlélteti. Így a hiba definiálásához a program egy határt szab, hogy ez a távolság mekkora lehet és amennyiben ezt az értéket valamely két koordináta különbsége meghaladja, a program beavatkozik. További kérdés, hogy ezt a problémát az algoritmus hogyan javítsa ki. A fizikai lehetetlenségből következik az is, hogy két szomszédos, helyesnek vélt pozíciót eredményező minták állásszögei közötti különbség csak kismértékű lehet, tehát a program nem követ el túl nagy hibát, ha a hiba megjelenésekor az előző képen lévő pozíció meghatározásához használt minta aktuális pozícióját használja fel.

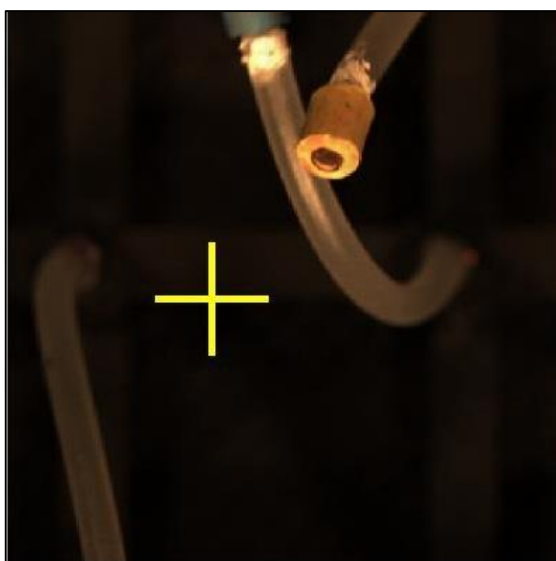
Összegezve: ha a használt minták középpontjainak valamely koordinátája – a tapasztalatok szerint – $5,3\text{ mm}$ -rel eltér egymástól, akkor a program az imént ismertetett hibakezelési eljárást hajtja végre.



3.11. Ábra: A hiba definiálása

3.2.4.2. Nagy térbeli különbség a szomszédos pozíciók között

Az alábbi ábra példát mutat egy újabb típusú hibára, azonban ennek definiálása nehezebb, mint az előző esetben. Ez esetben a korrelációs együttható értéke rendkívül magas (0,8971), továbbá az alkalmazott minták állásszögei sem térnek el a megengedettől nagyobb mértékben. Azonban megfigyelhető, hogy e pozíció és az előző felvételen lévő helyzet között rendkívül nagy távolság van, amelynek definiálása képezi a hibakezelés alapját.



3.12. Ábra: Hiba megjelenése

Ez az “ugrás” kimutatható úgy is, hogy kiszámítjuk az adott pontbeli sebesség koordinátáit. Amennyiben a kapott függvényben az egyes pontbeli értékek között a különbség nagy, akkor következtethetünk arra, hogy az algoritmus hibát követ el. A sebesség definiálható úgy, mint a pályagörbe idő szerinti első deriváltja, ahogy az alábbi összefüggés is mutatja:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (3.4.)$$

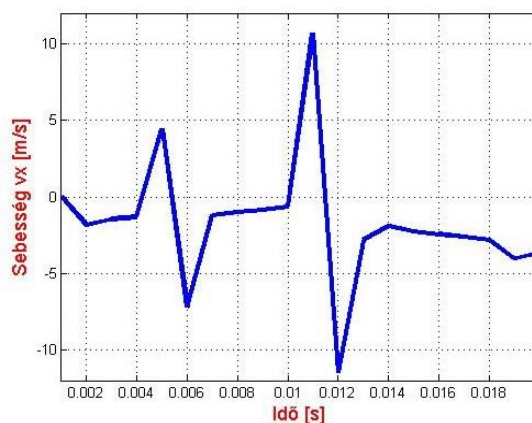
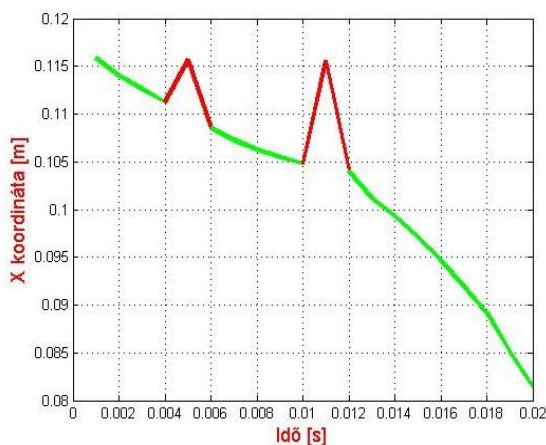
Fontos megjegyezni, hogy az algoritmus futtatása során kapott adatsorból csak a pillanatnyi értékeket tudjuk származtatni, mert a pályagörbének csak egyes pontjai ismertek és mivel a sebesség vektormennyiség, így a definíciók az alábbi összefüggés szerint módosul:

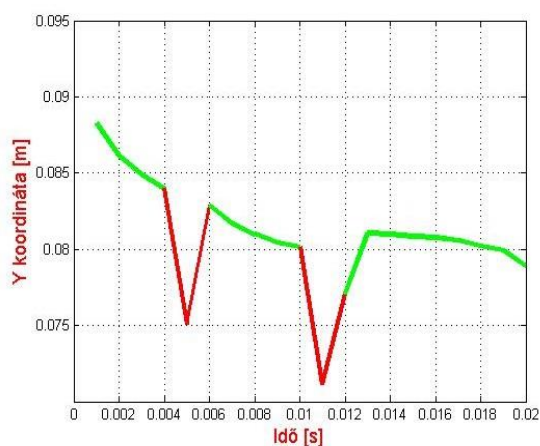
$$\mathbf{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot \mathbf{j} \quad (3.5.)$$

ahol Δx és Δy az x és y irányú elmozdulás, illetve Δt két szomszédos kép között eltelt idő, amelyet a képrögzítés során meghatározott mennyiségekből következően 10^{-3} s-ra adódik. Tehát ha a k -adik pozíció pontbeli sebességét szeretnénk meghatározni, akkor ahhoz a k -adik és a $(k-1)$ -edik pozíció közti elmozdulást kell első lépésként kiszámítani, majd ezt elosztani a két kép között eltelt idővel. Az így kapott összefüggést, amit a programozás során alkalmaztam az a () egyenlet tartalmazza.

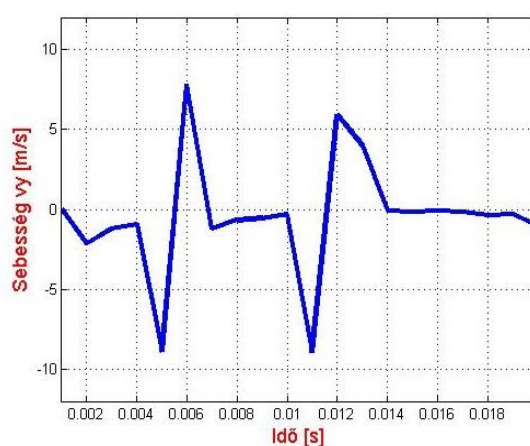
$$\mathbf{v}_k = \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t} \cdot \mathbf{i} + \frac{y_k - y_{k-1}}{\Delta t} \cdot \mathbf{j} \quad (3.6.)$$

Az imént levezetett összefüggésekből kapott eredményeket az alábbi ábrán tüntettem fel, amelynek bal oldalán a sárga színű cső mozgásgörbéjének koordinátái láthatók az idő függvényében, illetve az ábra jobb oldalán a kiszámított sebességértékek x és y irányú komponensei tanulmányozhatók. Jól látszik, hogy abban az esetben, ha a pályagörbében nagy ugrás van (pirossal jelzett szakaszok), ott a sebességértékek hirtelen megnőnek – vagy lecsökkennek –, szinte egy szakadás jelenik meg a függvényükben. Ha csak a sebességek grafikonjait látnánk, az esetben is megállapítható lenne, hogy a mozgásgörbében egy ilyen ugrás nem valósulhat meg, tehát egy ilyen lépés megjelenésekor a program hibát vét. Ennek definiálásához az egyes képeken helyesnek vélt pozíciók közötti különbségeket vesszük alapul: számszerűsítve, ha a pozíciók közötti különbség meghaladja a 100 *pixel*t, akkor a szóban forgó képen lévő pozíció javítására van szükség.





a.)



b.)

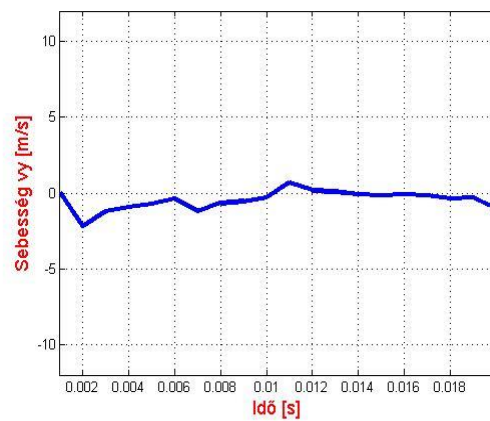
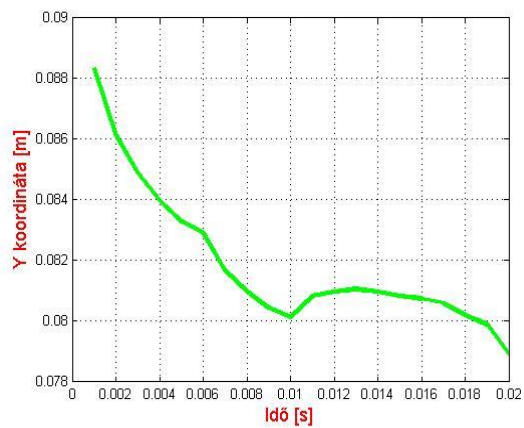
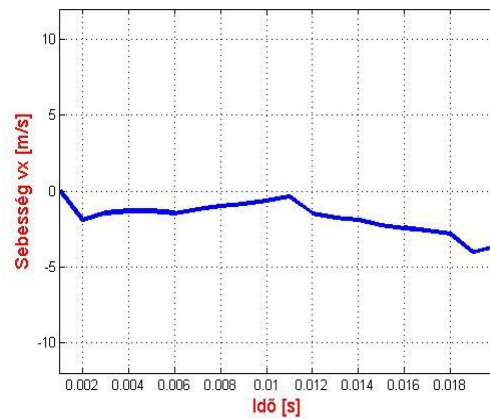
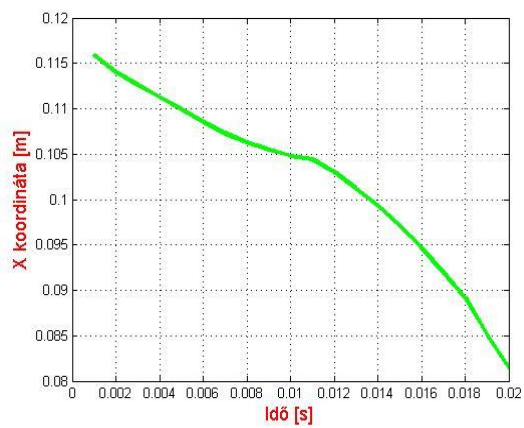
3.13. Ábra: A „Sárga” csövecske dinamikai jellemzői

a.) Mozgásgörbékben adódó nagy ugrás megjelenése

b.) A trajektóriagörbékben bekövetkező nagy ugrásból adódó sebesség-ingadozás

Megfigyelhető, hogy bizonyos esetekben a legnagyobb korrelációs együtthatóhoz tartozó minta nem szolgáltat jó eredményt, azonban nem állítható teljes bizonyossággal, hogy egyik minta sem eredményez helyes pozíciót. Némely esetben előfordul, hogy a megfelelő helyzetet eredményező mintának alacsonyabb a korrelációs együtthatója. Ilyenkor a program az egyes minták korrelációs együtthatóit csökkenő sorrendbe rendezi és megvizsgálja, hogy a maximumnál alacsonyabb együtthatójú minták milyen pozíciót eredményeznek: amennyiben közülük valamelyik egy előre meghatározott intervallumon belül van, akkor a továbbiakban ezt tekintjük az adott csőszakasz legmegfelelőbb helyzetének. Azonban ez sem biztos, hogy mindig jó eredményhez vezet. Ugyanis számolni kell azzal, hogy miként egyre több minta pozícióját vizsgáljuk, úgy a korrelációs együtthatójuk is csökken. Ebből következően meg kell határozni azon minták számát, amelyek pozícióit az algoritmus megvizsgálja. Amennyiben nem talál megfelelőt, akkor ezt úgy veszi, hogy a probléma – programozási szinten – nem oldható meg, manuális beavatkozásra van szükség. Ebben az esetben megjeleníti az adott képet és kéri a program kezelőjét, hogy a szóban forgó mozgóelem pozícióját manuálisan jelölje ki. Azonban manuális kijelölésre az esetek nagy többségében nincs szükség, a program megtalálja a helyes pozíciót öt „iterációs” lépésen belül.

E hibakezelési eljárás végeredménye az alábbi ábrán látható és megfigyelhető, hogy a sebességértékek között jelentősebb ugrás nem tapasztalható, amiből az következik, hogy a hibakezelési eljárás megfelelőnek bizonyult.

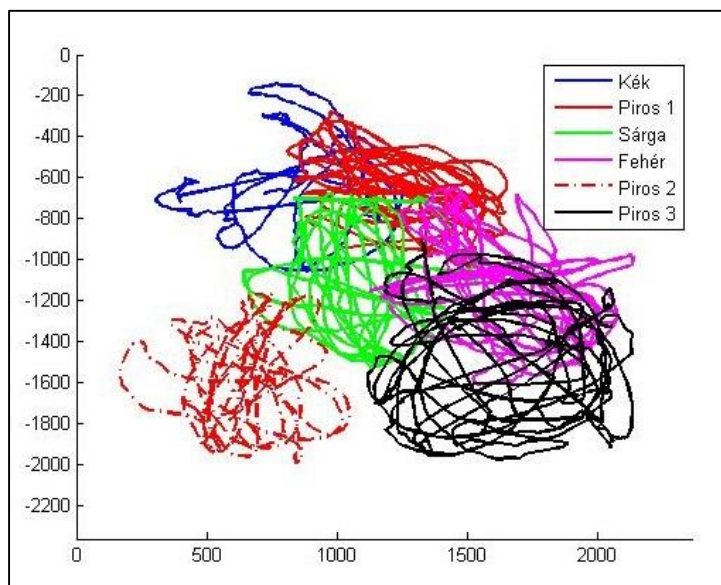


a.)
b.)

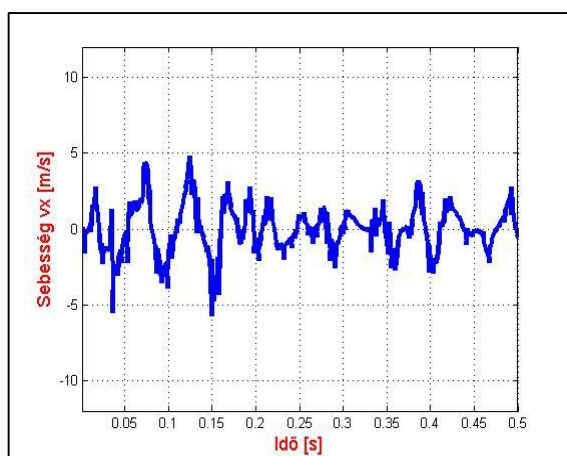
3.14. Ábra: A hibakezelés végeredménye
a.) A sárga csövecske pályagörbájének x és y irányú komponense
b.) A „Sárga”csövecske sebességfüggvényének x és y irányú komponense

4. KÖVETKEZTETÉSEK:

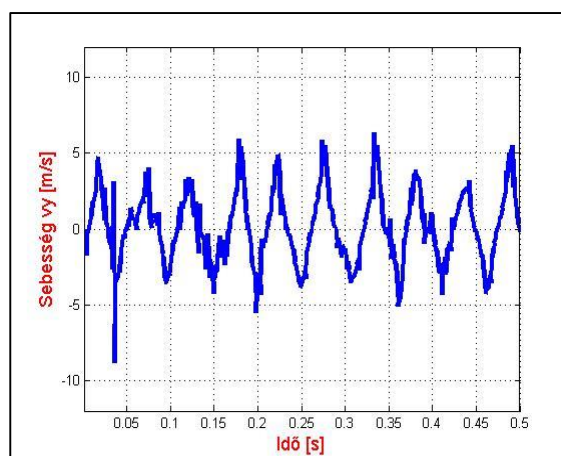
Miután kiküszöböltük az algoritmus által generált hibákat, a következő pályagörbéket kaptuk (4.1. Ábra/a.)). Ezek, mivel a sebességfüggvényekben jelentősebb ugrás (szakadás) nincsen – 4.1. Ábra/ b.) és c.) –, ezért megfelelnek a valós mozgásnak.



a.)



b.)



c.)

4.1. Ábra: Az algoritmus végeredménye

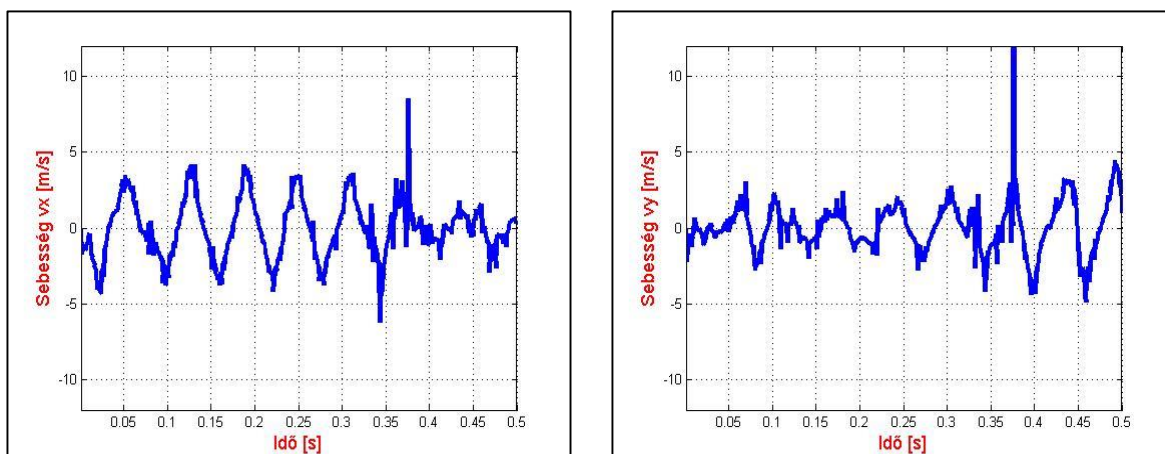
a.) Kapott pályagörbék

b.) Sebesség x irányú komponense ("Sárga" szín)

c.) Sebesség y irányú komponense ("Sárga" szín)

Némely színnél azonban elkerülhetetlen a tévesztés, ugyanis bizonyos esetekben előfordul, hogy két egymáshoz hasonló szín találkozik – például piros és sárga, amelyeknek a legfényesebb komponense egyaránt az R –. Ilyenkor a program nem észlel hibát: a korrelációs együttható megfelelően magas, a minták középpontjai között sincs túl nagy távolság, illetve a sebességfüggvényben sincs ugrásszerű változás. Ekkor előfordul, hogy rövid ideig a program

nem a megfelelő csövecskét követi, de néhány képpel később észlelni fogja ezt a hibát, ilyenkor az esetek nagy többségében nem talál helyes pozíciót és a felhasználót kéri ennek kijelölésére. Mivel a helyes pozíció és a rossz pozíció között az átlagos elmozdulásnál nagyobb távolság van, ezért ez a sebességfüggvényben is hirtelen változást fog generálni, ahogy az az alábbi ábrán megfigyelhető. Ez a hiba elkerülhetetlen, azonban ritkán, speciális esetekben fordul elő, így a hibakezelés során ezzel nem foglalkoztam.



a.)

b.)

4.2. Ábra: Példa egy nehezen definiálható hibára

a.) Sebességfüggvény x irányú komponense („Piros 1” szín)

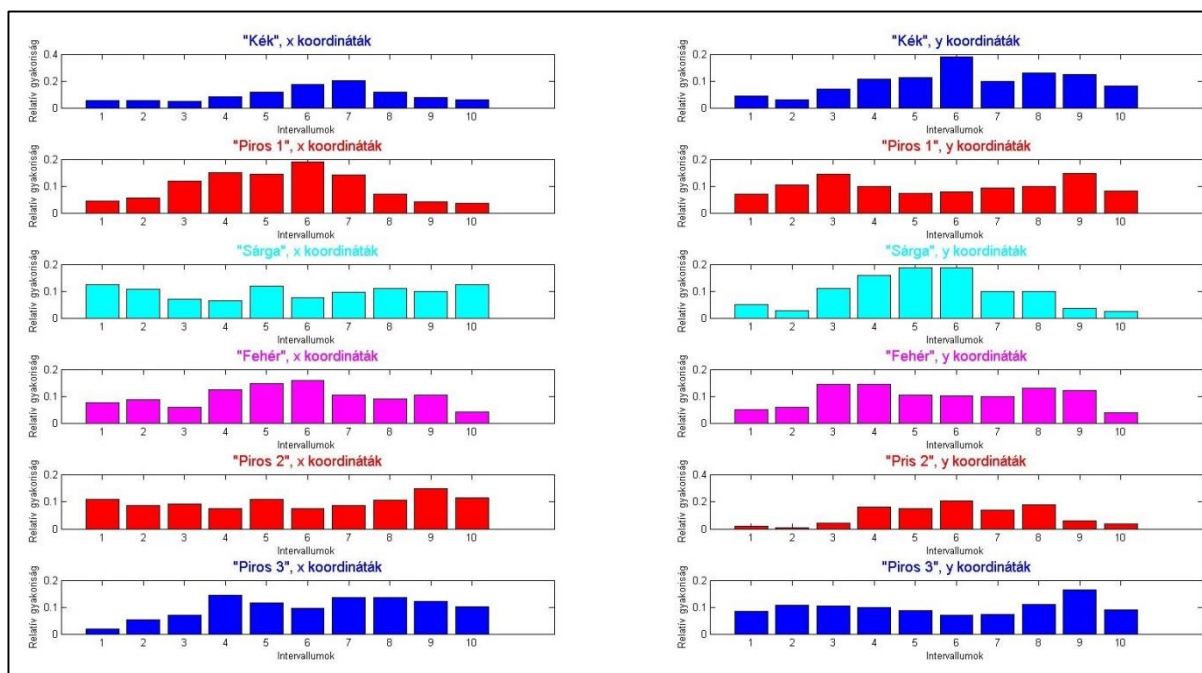
b.) Sebességfüggvény y irányú komponense („Piros 1” szín)

4.1. Az eredmények értelmezése

Ahhoz, hogy értelmezsem a kapott eredményeket, egy külön algoritmus írása volt szükséges. A célom az volt, hogy megvizsgáljam az egyes mozgóelemeket, hogy az általuk súrolt területeken belül milyen relatív gyakorisággal fordulnak elő.

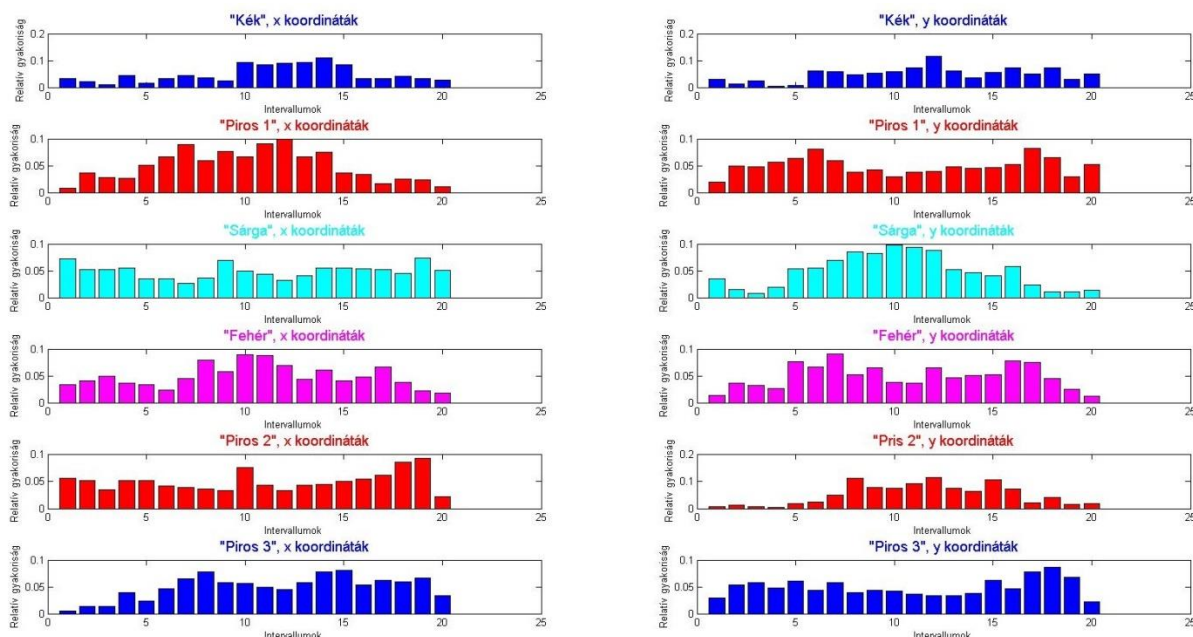
Ehhez először megvizsgáltam, hogy a csövecskék mozgásgörbéinek komponenseiben melyek a maximális és minimális értékek. Ezen értékpárok kijelölik azt az intervallumot, ahol az egyes mozgóelemek a vizsgált időtartamon belül előfordulnak. Ezt követően felosztottam ezt a területet a vízszintes és függőleges tengely mentén egyenlő nagyságú sávokra, majd egy egyszerű logikai operációval megvizsgáltam, hogy a mozgásgörbéket alkotó pontok mely részterületbe esnek. Ebből egy másik adathalmazt hoztam létre, amely tartalmazza, hogy az egyes intervallumokba hány elem tartozik. Azonban felvetődik a kérdés, hogy hány részre célszerű osztani a mozgási területet. Először öt részre osztottam, amelyből kiderült, hogy az egyes csoportok között nincs számottevő különbség, tehát nem lehetett megállapítani, hogy hol fordultak ezek elő a legnagyobb gyakorisággal. Ezt követően növeltem a sávok számát tízre, amelynek eredményét az alábbi ábra szemlélteti. Jól látható, hogy a színek nagy többségénél

megfigyelhetünk egy olyan területet, ahol az oda tartozó elemek száma nagyobb, mint az összes többi helyen.



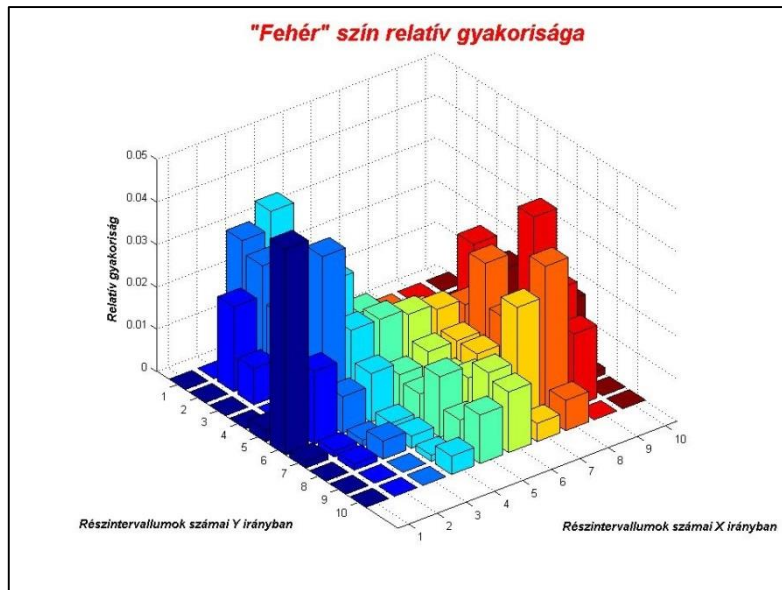
4.3. Ábra: A csövecskék pozícióinak relatív gyakorisága, amennyiben az általuk súrolt területet 10×10 egyenlő részre osztjuk

Azonban az elemek eloszlása az egyes sávokban még mindig relatíve egyenletes és mivel a célunk egy konkrét intervallum definiálása, ahol az elemek száma maximális, ezért a vizsgálati területet még több részre, húszra osztottam, ahol a színek nagy többségénél már határozottan megfigyelhető a vizsgálati területnek egy olyan része, ahol az elemek száma kiemelkedő. Ezen esetnek a relatív gyakorisági hisztogramját az alábbi ábra szemlélteti. Ha még jobban ki szeretnénk emelni azt a területet, ahol ez maximális, akkor ez a terület tovább osztható, például 50 részre.

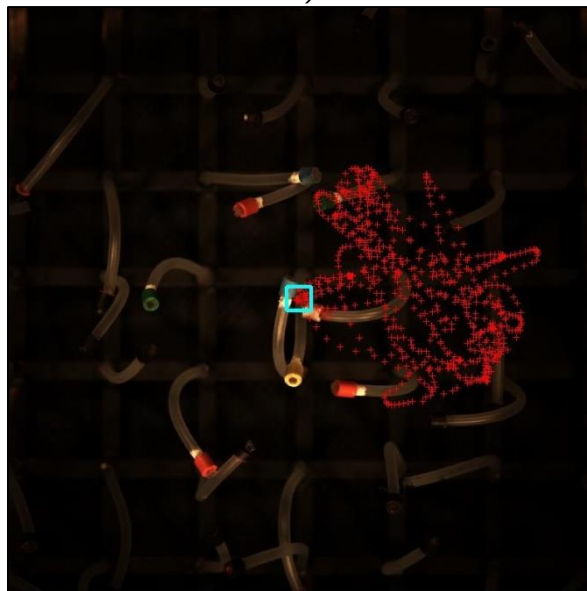


4.4. Ábra: A csövecskék pozícióinak relatív gyakorisága, amennyiben az általuk súrolt területet 20×20 egyenlő részre osztjuk

A fent részletezett megoldás a mozgási területet csak – x és y irányban elhelyezett – sávokban vizsgálja. Azonban ha arra vagyunk kíváncsiak, a vizsgálati tartomány egy kisebb darabján milyen gyakorisággal fordulnak elő a csövecskék, az egyes sávokat is fel kell osztani kis részekre, amelynek eredményét síkban nem, csak térben lehet ábrázolni. Ennek 3D-s oszlopdiagramját egy konkrét cső esetén, az alábbi ábrán figyelhetjük meg. Ebből látható, hogy a fehér színű cső által súrolt területnek van egy olyan részterülete, ahol az a legnagyobb gyakorisággal fordul elő, amelyet az ábra alsó részén szemléltettem. Itt a *türkiz* színű téglalap jelképezi azt a területet, ahol a relatív gyakoriság maximális, illetve a *piros* pontsereg pedig a csövecske mozgásgörbéjét.



a.)



b.)

4.5. Ábra:

- a.) A "Fehér" szín relatív gyakoriságának térbeli ábrázolása
 b.) A "Fehér" szín relatív gyakoriságának grafikus megjelenítése

Ha ezt a hisztogramot az összes vizsgált csődarabra elkészítjük, ezeken a maximumot megkeressük és az eredményt szemléltetjük az előbbihez hasonló módon, akkor eredményként az alábbi ábrát kapjuk, amelyen a téglalapok színei az alábbi csődarabokat jelképezik:

- *kék* – *Kék*
- *piros* – *Piros 1, Piros 2, Piros 3*
- *fehér* – *Fehér*
- *sárga* – *Sárga*



4.6. Ábra: A vizsgált csövecskék leggyakoribb elfordulásának helyei a felvételsorozat első elemén

4.2. Célkitűzések:

A munka során az egyes mozgóelemek mozgásviszonyait térképeztem fel a MATLAB programcsomag segítségével, amely során megállapítottam, hogy a csövecskék a vizsgált időintervallumon belül hogyan mozognak, illetve feltérképeztem, hogy a képen belül hol fordulnak elő a legnagyobb gyakorisággal. A további vizsgálatok során cél lehet annak megállapítása, hogy az egyes trajektóriagörbék között van-e átfedés, és ha igen, akkor milyen mértékű. Ezt a vizsgálatot ugyancsak keresztkorreláció segítségével tudjuk végrehajtani, csak itt a bemenő paraméterek nem képek lesznek, hanem diszkrét jelértékek.

Továbbá a későbbiekben megállapítható, hogy a mozgóelemek milyen módon mozognak: a dinamikájukban van-e rendszer, avagy kaotikus jelleget öltenek. Ennek megállapításának legegyszerűbb módja, ha a dinamikai rendszerre kiszámítjuk az úgynevezett Lyapunov-spektrumot: amennyiben ez tartalmaz akár egyetlen pozitív elemet, akkor a mozgási jelleg kaotikus, ellenkező esetben pedig sztochasztikus, tehát a mozgásban van valamiféle rendszer. Azonban a teljes spektrum kiszámítása rendkívül bonyolult matematikai számításokat követel, egyszerűbb, ha a maximum meghatározására törekszünk, amelyre a szakirodalom különféle programozási eljárásokat biztosít. A későbbi munkánkban ez kitüntetett szerepet fog képviselni, ugyanis ennek segítségével következtetni lehet a turbulenciagenerátor által létrehozott áramlásra is.

HIVATKOZÁSOK

Libby, P. A.: Introduction to Turbulence. New York, Taylor and Francis. 1996

Lajos, T.: Az áramlástan alapjai. IV.kiad. Budapest, Műegyetemi Kiadó. 1992. 684 p.

Hinze J.: Turbulence, 2nd ed. New York, McGraw-Hill Book Company. 1975. 790 p.

Simmons, L.F.G. & Salter, C.M.A.: Experimental investigation and analysis of the velocity variation in turbulence. In: Proc. R. Soc. Lond. A. (1934) Vol. 165. 212-234. p

Gad-el-Hak, M., Corrsin, S.: Measurement of the nearly isotropic turbulence behind a uniform jet grid. In: Journal of Fluid Mechanics, (1974) Vol 62. 115-143. p

Makita, H., Sassa K.: Active turbulence generation in a laboratory wind tunnel. In: Advances in Turbulence 3, (1990) 7. sz. 497-505. p.

Mydlarsky L., Warshaft Z.: On the onset of high-Reynolds-number grid-generated wind turbulence. In: Journal of Fluid Mechanics, (1996) Vol. 320. 331-368. p.

Kang H. S., Chester S., Meneveau C.: Decaying turbulence in an active-grid generated flow comparison with large-eddy simulation. In: Journal of Fluid Mechanics, (2003) Vol. 480. 129-160. p.

Szaszák, N.: Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation. MSc diplomamunka. Miskolci Egyetem, 2011. 87. p.

LaVision GmbH: ImagerproHS4M, Product Manual. Göttingen, Németország. 2014

AF Micro-Nikkor 105/2.8 D típusú lencse: <http://www.kenrockwell.com/nikon/105af.htm>,
letöltési idő: 2014.10.29.

Gonzalez, R.C., Woods, R.E., Eddins, S.L.: Digital Image Processing Using MATLAB. 2nd ed. Knoxville, Gatesmark Publishing. 2009. 344 pp.