



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



Turbulens lángok felszínének 3D rekonstrukciója sztereografikus fényképezéssel

Készítette:
László Noémi

Konzulens:
Dr. Tóth Pál
Egyetemi tanársegéd

Energia és Minőségügyi Intézet
Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti tanszék
2014

Tartalomjegyzék

Bevezetés	1
1. Irodalmi áttekintés	2
2. A módszer bemutatása	7
2.1 A sztereo leképezés alapjai	7
2.2 Kamera kalibráció	8
2.3 Képelemzés	13
3. Eredmények.....	15
3.1. Az elfűjt láng képe.....	16
3.2. Videoelemzés	18
3.3. Rekonstrukciós hibák.....	20
Összefoglalás	21
Irodalomjegyzék	22

Bevezetés

Az ipari gyakorlatban használt lángok szerkezete aszimmetrikus és szabálytalan, az égés és áramlás szempontjából turbulens-diffúz láng. A világító lángok felületének egyik lehetséges definíciója az izzó korom és hidroxigyökök tetszőleges izokoncentráció felülete. Az ipari lángokban az áramlást meghatározóan befolyásoló turbulens méretskálák ismerete fontos, mivel a láng hőátadási viszonyai erős korrelációban vannak a turbulens örvények méreteloszlásával. Mivel a turbulencia háromdimenziós (3D) jelenség, olyan vizsgálati módszerre van szükség, mely nem intruzív, alkalmazható ipari környezetben is és 3D adatokat szolgáltat a láng áramlási viszonyairól. Ebben a dolgozatban célunk egy ilyen módszer vizsgálata.

A sztereoszkópia egy olyan képalkotási módszer, melynek segítségével a térlátás érzete kelthető, mivel ugyanarról a térbeli pontról két kép készül, különböző nézőpontokból, ezzel utánozva az emberi szempár látási mechanizmusát. A térlátás érzete mellett, amennyiben a sztereoszkopikus fényképek digitálisak, digitális képelemzés segítségével a jelenet tényleges 3D koordinátái is rekonstruálhatók. A dolgozatban laboratóriumi méretű diffúz lángok szerkezetét vizsgáljuk sztereoszkópia segítségével.

Bunsen égővel előállított diffúz, lamináris-turbulens lángokról egy sztereokamera segítségével fényképeket készítettünk, a rekonstrukció a sztereokamera által rögzített képpárokból történt. A rekonstrukció háromszögeléssel valósítható meg, melyhez szükséges a kamera előzetes kalibrálása. A kalibráció során meghatározhatók a kamera és a lencsék geometriájától függő optikai paraméterek. A készített sztereoszkopikus felvételeket automatikus, digitális képelemző algoritmusokkal dolgoztunk fel, melyek segítségével a lángok felszínét rekonstruáltuk.

1. Irodalmi áttekintés

A láng a tűz látható, gáz halmazállapotú része. A lángnak a láthatósághoz elegendő sugárzását az égési zónában lezajló exoterm reakció hőtermelése okozza. A legtöbb láng elég meleg ahhoz, hogy kis energiasűrűségű ionizált plazma halmazállapotúnak tekinthessük [1].

A lángok különbözőek lehetnek a tüzelőanyag és az oxidálószer keverési módja, és az áramlási sebesség függvényében. Az 1. táblázat összefoglalja a fő lángtípusokat.

1. táblázat: A tüzelőanyag és oxidálószer keverési módjai [2]

Keverési mód	Áramlás	
	alacsony gázsebesség	Nagy gázsebesség
előkevert	előkevert lamináris láng	előkevert turbulens láng
diffúz	lamináris diffúz láng	turbulens diffúz láng

Keverési szempontból a láng lehet diffúz vagy előkevert. Az előkevert lángok esetén a tüzelőanyag-oxidálószer keveréket előzetesen keverik össze, mielőtt az az égéstérbe jutna. Az előkevert égők alternatívája a turbulens-diffúz láng. A tüzelőanyag részecskék a lángon belül keverednek el turbulens diffúz módon a levegővel [3].

A lángok szabad szemmel való láthatóságát a lángot alkotó szilárd és gáz halmazállapotú komponensek hőmérsékleti sugárzása okozza [4].

A hőmérsékleti sugárzás az anyagok hőmozgása miatt kibocsátott elektromágneses sugárzás. Minden anyag bocsát ki hősugarakat a test hőmérsékletétől ($T > 0\text{K}$) és anyagi minőségétől függő hullámhossztartományban és intenzitással. A sugárzás kibocsátásakor a belső energia alakul át elektromágneses energiává [5]. A hősugárzás intenzitása a Planck törvény alapján függ a test abszolút hőmérséklettől és a kibocsátás hullámhosszától [6]:

$$E_{\lambda} = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

ahol:

λ : hullámhossz, μm

c_1 : $3,74 \cdot 10^{-8}$, W/m^2

c_2 : 0,01438, $\text{m} \cdot \text{K}$

T: hőmérséklet, K

A gázok sugárzását a molekulák véletlenszerű ütközése során kibocsátott elektromágneses sugárzás adja. A Kirchhoff törvény szerint a sugárzás kibocsátó képesség a sugárzás elnyelő képességet is jelenti [6].

Adott λ hullámhosszon a gázközeg adott pontjára érkező sugárzás intenzitása a Beer-törvény szerint:

$$E_{\lambda} = E_{\lambda 0} e^{-\alpha_{\lambda} p s} \quad (2)$$

ahol:

$E_{\lambda 0}$: a sugárzás intenzitása a kibocsátás helyén, W/m^2

s : az adott gázközegen történő áthaladási úthossz, m

p : a sugárzás elnyelő képességével rendelkező komponens parciális nyomása, Pa

α_{λ} : kioltási (csillapítási) tényező, $\text{m}^{-1}\text{Pa}^{-1}$

Mivel a láng látható sugárzása a lángot alkotó komponensek koncentrációjától és hőmérsékletétől függ, a láng intenzitása és színe függ a tüzelőanyag minőségétől és az égési folyamatok sebességétől. A szilárd részecskék, - így a korom vagy hamu - hőmérsékleti sugárzásának spektruma jól közelíthető a feketetest-sugárzás spektrumával. Az ipari gyakorlatban használt lángok tipikus hőmérsékletén a feketetest-sugárzás spektruma sárgavörös színt eredményez a látható tartományban. Emiatt és a gázsugárzás kis intenzitása miatt azok a lángok jól láthatók, melyek sugárzását a szilárd részecskék sugárzása dominálja [7].

Az ipari lángok jelentős része turbulens áramlású. A turbulens áramlás olyan áramlási tartomány, melyben az áramlást leíró fizikai mennyiségek (nyomás, sebesség) térben és időben gyorsan változnak. A turbulens áramlásban különböző méretű örvények keletkeznek. A turbulens mozgás kinetikus energiájának nagy részét a nagyméretű örvények hordozzák. Ez a kinetikus energia átadódik a nagyméretű örvényektől a közepes méretűekre, közelítőleg veszteségmentes mechanizmuson keresztül. Miközben a közepes méretű örvények kisebb méretű örvényekké esnek szét, kevés kinetikus energia alakul hőenergiává. Amikor az örvények elég kicsivé válnak, a kinetikus energia szétoszlik és hővé alakul át. Ez a folyamat folytatódik, folyamatosan kisebb és kisebb örvényeket létrehozva, több és több hőt termelve, mely során egy örvény hierarchia alakul ki. A folyamatban végül olyan kisméretű örvények

keletkeznek, melyeknél a molekuláris diffúzió szerepet kap. A kinetikus energia konverzióját hőenergiává a kis örvényméretek skáláján disszipációnak nevezik [8].

Az a mérettartomány, amelyen a legkisebb örvények léteznek, a Kolmogorov skála, a legkisebb skála a turbulens áramlásban. A Kolmogorov skálán az áramlási viszonyokat a viszkózus dominálja, s turbulens kinetikus energia hővé alakul át [9].

A turbulens mozgás olyan mozgás, melyet várható (átlagos) és véletlenszerű mozgás összegeként foghatunk fel. Egy turbulens sebességmező, $\mathbf{u}$, ennek alapján a következőképpen bontható átlagos és véletlen komponensekre [10]:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (3)$$

ahol:

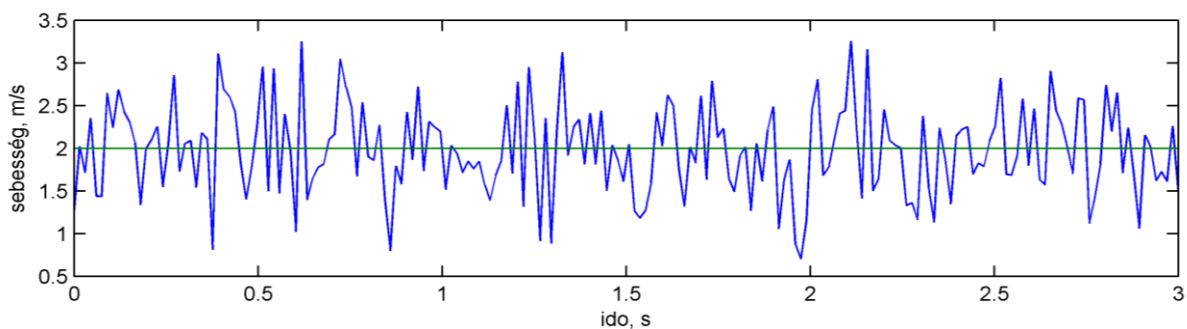
$\mathbf{u}$: pillanatnyi sebességmező

$\mathbf{u}'$: átlagos, helyi sebességtől való eltérés

$\bar{\mathbf{u}}$: átlagos sebességmező

Az 1. ábra az egy pontban mért sebesség fluktuációját illusztrálja egy turbulens áramlásban. A turbulens áramlás sebességmezőjének átlagra és véletlen fluktuációra való felbontását Reynolds-dekompozíciónak vagy Reynolds-átlagolásnak nevezzük [11].

A turbulencia tárgyalása azért fontos a dolgozat szempontjából, mert a sztereografikus felületrekonstrukció módszere olyan felvételeket igényel, melyeken jól megkülönböztethető és azonosítható minták láthatók, mind a bal, mind a jobb oldali képeken. Teljesen lamináris áramlás (olyan áramlás, melyből teljesen hiányzik a turbulencia) esetében a láng intenzitása lokálisan uniform, így a lángról alkotott képek nem tartalmaznak azonosítható mintákat. A turbulencia tehát egyben követelménye és vizsgálati célpontja is a lángok sztereografikus felületi rekonstrukciónak.



1. ábra: Turbulens áramlás esetében egy pontban mért sebességek fluktuációja. Az átlagsebesség 2 m/s.

A láng alakjának ismerete hasznos, mivel az alakból következtetni tudunk a turbulens méretskálára, a perdítés mértékére, a láng meghatározó áramlástani mechanizmusára és ezek alapján a reakciókinetikai és hőátadási viszonyokra.

A láng alakját a láng perdületének és tengelyirányú lendületének aránya határozza meg leginkább. A keveredés gyorsítása érdekében a gázégőkben a sugarat perdítő elemekkel forgómozgásba hozzák, így növelve a láng turbulenciáját [12]. Ezért a láng alakjának üzemelés közbeni követésével vizsgálható a perdítés mértéke. A perdítés mértéke erősen befolyásolja a láng konvektív hőátadási viszonyait.

A láng alakjának definiálására korábban különböző módszerek álltak rendelkezésre. Az egyik eljárás során nagy záridejű és nagy sebességű színes kamerát alkalmaztak az előkevert, turbulens láng égésének vizualizálására. Különböző alakú lángok vizsgálatakor a kamera lehetővé teszi a láng dinamikájának és szerkezetének meghatározását. A módszer során bebizonyosodott, hogy a különböző égési módok eltérő lángfelületi redőzöttséget, így eltérő turbulenciát eredményeznek [13].

A láng gyulladását és terjedését vizsgálták Schlieren eljárással és színes sztereo képalkotási technikával. A láng 3D-s megjelenítése és annak digitális rekonstrukciója a hagyományos sztereo rekonstrukciós módszereken és a láng digitális színelemzésén alapul. E technikákat kombinálták a Schlieren módszerrel. A különböző összetételű közegekben a fény eltérül, és az eltérülés mértékéből a különféle paraméterek számíthatók. Ez – kombinálva a kemiluminescens vizsgálattal – lehetővé teszi az égési folyamat áramlási viszonyainak feltérképezését. A láng színelemzése lehetőséget nyújt a helyi láng struktúrák ábrázolására, ezáltal a 3D rekonstrukcióra is [14].

A szénpor tüzelésű égők által generált lángok örvényszámának meghatározását teszi lehetővé a CCD módszer. A vizsgálat lehetővé teszi a különböző turbulenciájú lángok vizsgálatát. A módszer lehetővé teszi a lángok jellemzőinek 2D-s eloszlása alapján az örvényáramok lángstruktúrára gyakorolt hatásának vizsgálatát. A CCD vizualizációs rendszer a spektrális és statisztikai paraméterek térbeli jellemzésével biztosítja a lángok recirkulációs területeinek és áramlási viszonyain keresztül turbulenciájának jellemzését [15].

Az ipari gázégő lángok szerkezetének és dinamikájának jellemzésére képfeldolgozási és adatelemzési módszer alkalmazható. Nagy sebességű képalkotást használnak a láng dinamikai és mennyiségi jellemzésére. A sztereo képelemzés a láng spirális szerkezetét mutatja. Sztereoszkópikus képalkotás is alkalmazható a turbulens lángok felszínének vizsgálatára. Sztereo képek digitális feldolgozása és számítógépes látás segítségével a láng felületének 3D

geometriája rekonstruálható. A sztereoképek előállításához egy kamera elegendő. A képek felbontása függ a záridőtől és a kamera érzékenységtől. A technika alkalmas a láng minőségi és mennyiségi jellemzésére [16].

2. A módszer bemutatása

E fejezetben a képalkotó módszer elméleti alapjait, a sztereo kamera kalibrációját és a képelemzési eljárást ismertetjük.

2.1 A sztereo leképezés alapjai

Egy digitális kamera segítségével egy 3D valós látványról 2D kép készíthető. A sztereografikus fényképezéssel előállítható a 2D felvételekből a 3D rekonstrukció.

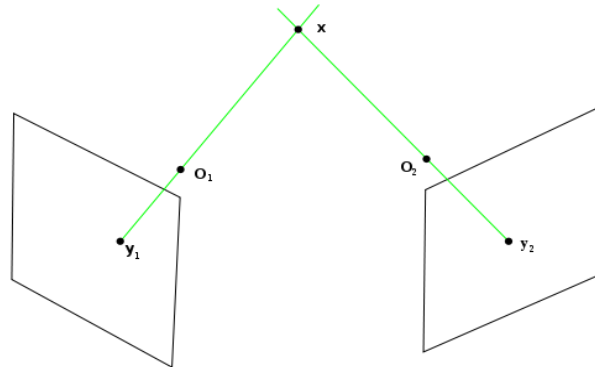
A sztereokamera két, 3D látványt leképező projektív kamera, mely speciális, nem középpontos vetítést végez [17].

A két kamera képe között geometriai kapcsolat van. A projektív kamera tulajdonságaiból adódóan az X pont és annak x és x' képei valamint a C és C' kamera középpontok ugyanabba a síkba esnek (epipoláris sík). Az x és x' pontok vetítési vonala az epipoláris síkban metszve az X pontot adja. A két kameraközéppontot összekötő egyenes a bázis egyenes, melynek helyzete nem változik, s illeszkedik az epipoláris síkra. A bázis egyenes egy speciális egyenes, amely az egyik kameraközéppont képét állítja elő a másik kamerában. Az epipólusok a bázis egyenes dőléspontjai a bal és jobboldali képsíkkal [17].

Az epipoláris sík képsíkokkal alkotott metszete az epipoláris egyenes, mely az egyik kamera x pontjához tartozó vetítősugar egyenese a másik kamerában [18].

Az adott sztereo kamera mátrixokból és pontpárokból háromszögeléssel (triangulációval) meghatározható a megfelelő 3D pont.

A 2. ábrán a trianguláció elve látható. Egy pont 3D (X, Y, Z) helyzete rekonstruálható a pont perspektív vetületéből a kamerákon a kamerák relatív helyzetének és pozíciójának ismeretében.



2. ábra: Trianguláció elve [19]

A pontot a kamera fókuszpontján (O_1 , O_2) áthaladó vonal mentén vetítik, mely két pontot (y_1 , y_2) eredményez. Ha y_1 és y_2 adott és ismert a kamera geometriája, a két vetítési vonal meghatározható [19]. A vetítési vonalak ideális esetben az X pontban metszik egymást. A mélység ismeretében a 3D pont meghatározható.

A diszparitás az x koordináták eltérése. A diszparitás és a mélység fordítottan arányos, és számítható egymásból kalibrált kamera esetén [18].

$$Z = f \frac{B}{d} \quad (4)$$

ahol:

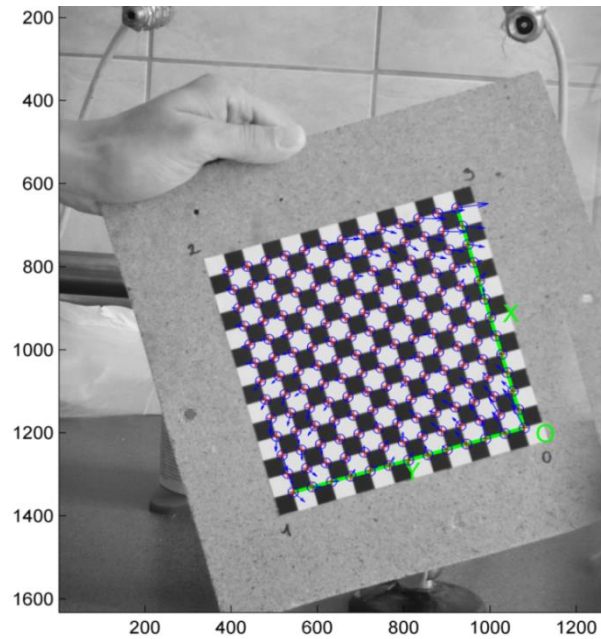
Z: mélység

d: diszparitás

B: Bázistávolság

2.2 Kamera kalibráció

A 3D rekonstrukció lényege a pontmegfeleltetés, melynek egyik típusa a ritka illesztés. A sztereó képpárból kinyert sarokpontok egymásnak megfeleltethetők. (3. ábra)

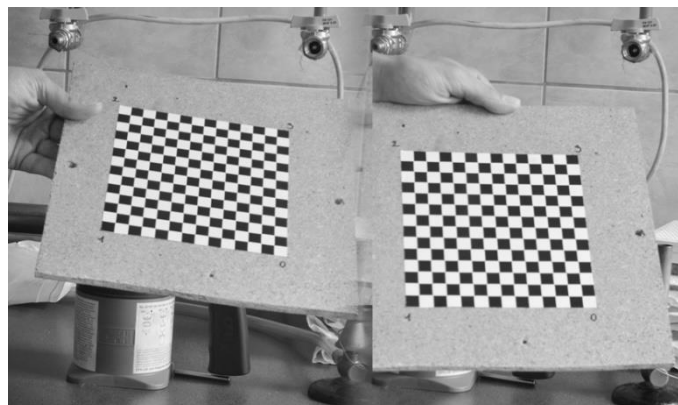


3. ábra: Kalibráláshoz használt, detektált sarokpontok

A kamera kalibráció segítségével a kameramátrix meghatározható. Ez azért lényeges, mivel a kamera mátrix a kamera belső paramétereit, a fókusz távolságot, a lencse geometriai torzítását adja. A különböző koordinátarendszerek közötti átmenetet képző egyenletrendszerek ismerete a kamera kalibráció [20]. Ha a kameramátrix ismert, egy tetszőleges pont képe előállítható és bármely képpont visszavetíthető.

A kalibráció alapja a pontmegfeleltetés a 3D valós pontok és azok 2D képei között. Egy kalibrációs minta segítségével a megfelelő képpontok egyszerűen megtalálhatók, amennyiben ismertek annak 3D-s méretei.

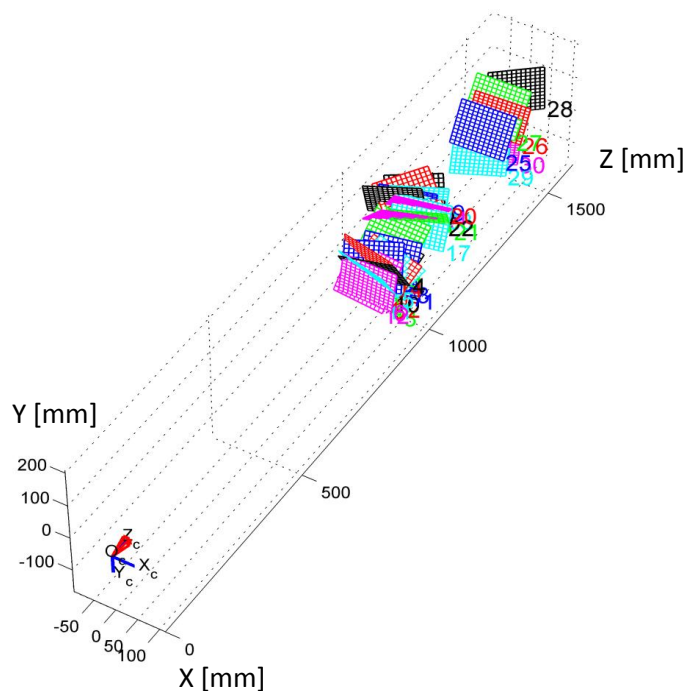
Ilyen képpontok a kalibrációs minta sarokpontjai, ezért a kalibrálás során sakktábla-szerű kalibrációs mintákat használtunk (4. ábra).



4. ábra: A kalibráció során használt sakktábla-szerű mintázat

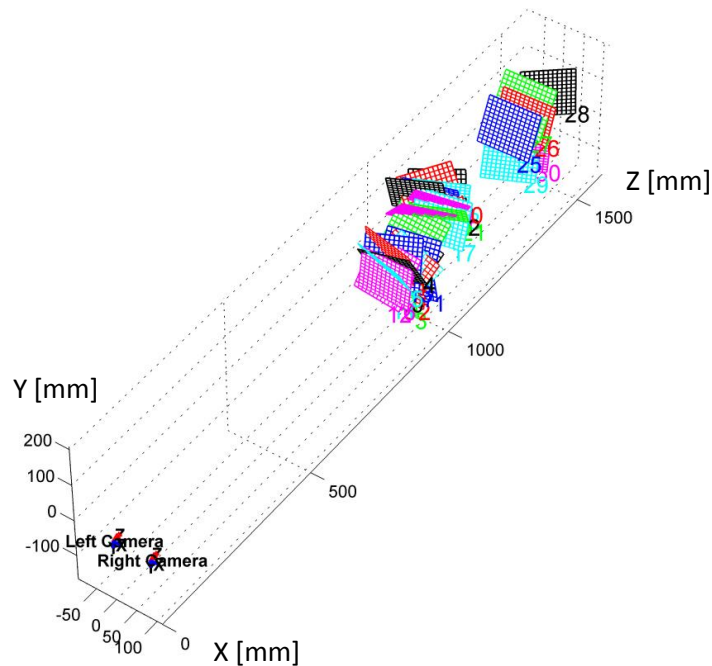
A kalibrációhoz a bal és jobb kamera kalibrálása szükséges külön-külön. A kalibráláshoz különböző síkok szükségesek, amely a kalibrációs minta elforgatásával érhető el. A pontos kalibrációhoz célszerű nagyszámú (több tíz) síkot alkalmazni.

A bal sztereokamera kalibrációjához használt síkok az 5. ábrán látható.



5. ábra: A kalibráláshoz használt síkok kamera-központú ábrázolása

A sztereo kalibrálásához mindkét kamera kalibrációja szükséges. A bal és jobb oldal kalibrálása külön történik. A két kalibráció együtt adja a sztereo kalibrálást (6. ábra).



6. ábra: Kalibráláshoz használt síkok és sztereo kamerapár ábrázolása a sztereo kalibrálás után

Standard sztereo konfigurációt feltételezve a megfelelő pixelek a két kép esetén ugyanabban a sorban találhatóak. Ezek összehasonlításának legegyszerűbb módja szürkeárnyaltos képek segítségével, az egyes képpontok intenzitásának összehasonlításán alapul. Ebben az esetben az alábbi összefüggés érvényes [17]:

$$x \leftrightarrow x' \rightarrow f(x) = g(x') \quad (5)$$

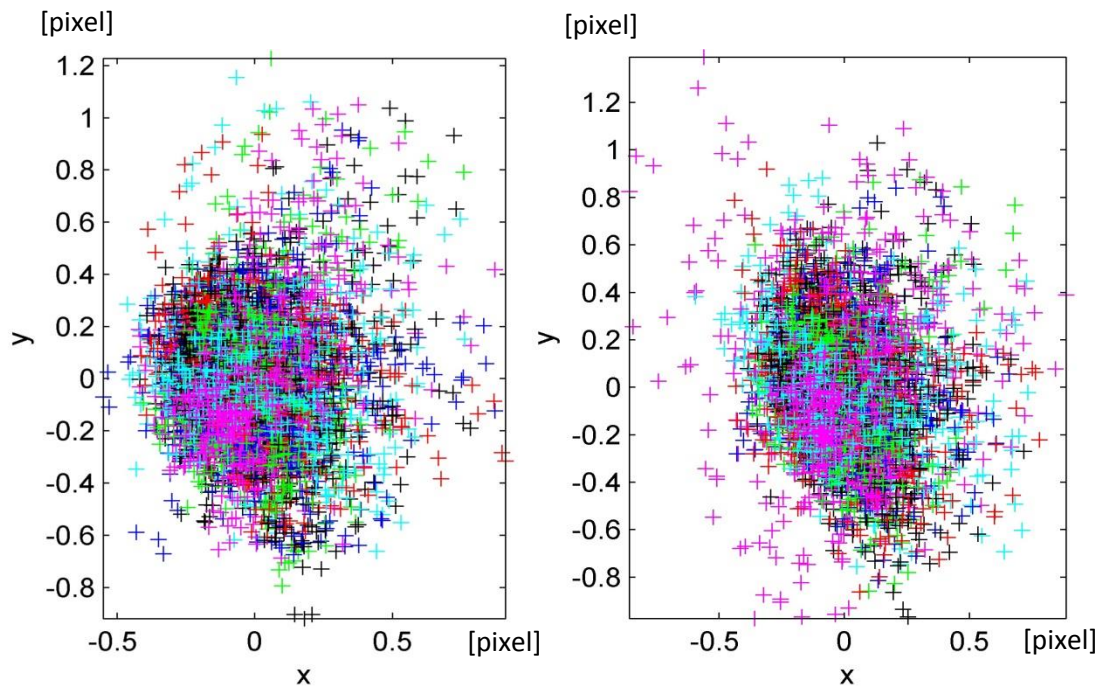
ahol:

f: a kép baloldali képfüggvénye

g: a kép jobboldali képfüggvénye

Az intenzitást különféle tényezők befolyásolják, ezért az összehasonlítás nem pixel szinten, hanem annak egy kis területén, ablakban történik, átlagintenzitások segítségével.

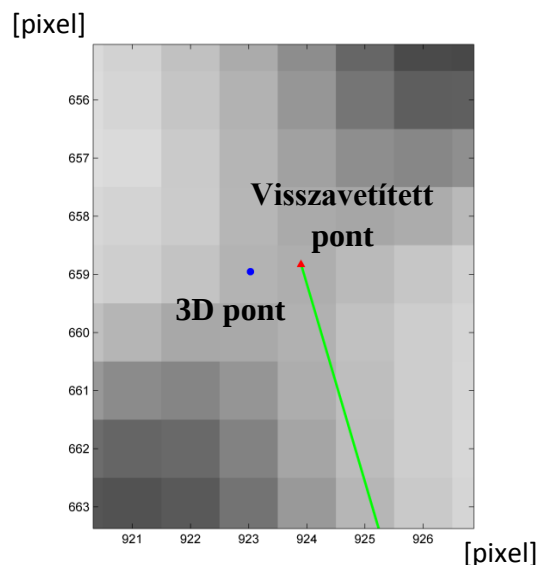
A 3D felületekről visszaverődő fény intenzitása befolyásolja az összehasonlítást, ez elkerülhető az ablakon belüli pixelek normalizálásával (a pixel intenzitások helyi kiegyenlítésével) [17].



7 ábra: Visszavetített pontok hibájának mértéke az eredeti 2D pontokhoz képest a bal és jobb oldali képeken

A normalizálást követően az x és x' pont hasonlósága vizsgálható.

A 7. ábrán a bal és jobb lencse kalibrálása során jelentkező hibák láthatóak. A pontok visszavetítése során hibák jelentkezhetnek. A 8. ábrán a sztereoszkopikus kalibráció után rekonstruált 3D pont visszavetítése látható a 2D képre.



8. ábra: Visszavetítési hiba

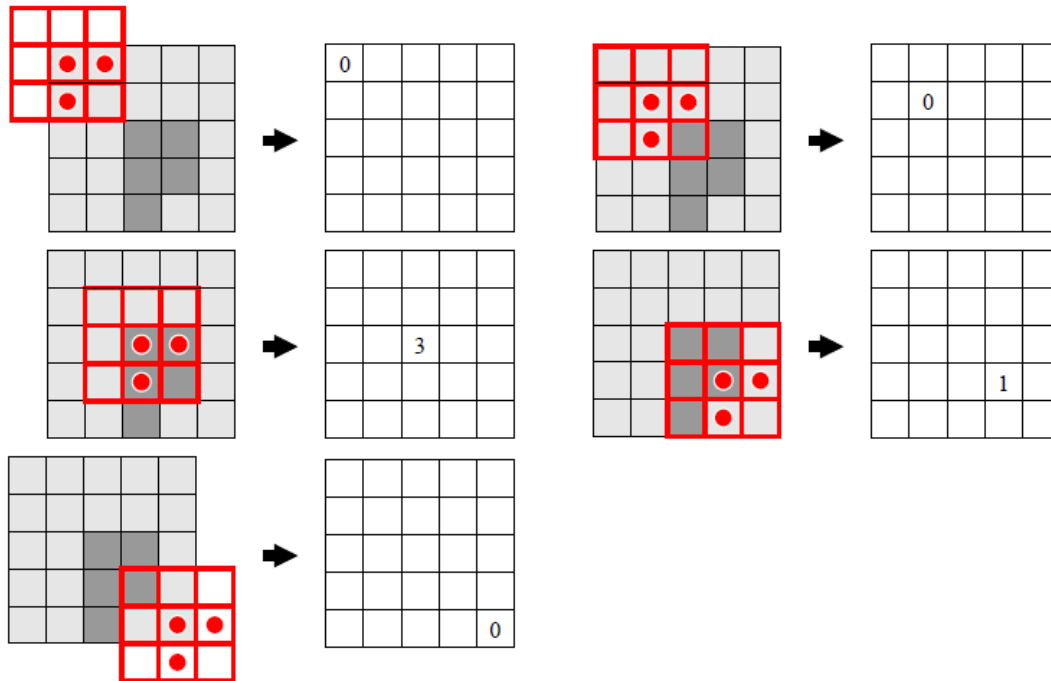
A geometriai torzítás (a lencse torzítása) ronthat a 3D-2D leképezésen, ezek a hibák kompenzálhatók, így a fennmaradó geometriai hiba csökkenthető.

Előfordul, hogy a vetítési vonalak nem metszik egymást a 3D-s térben. Ezek a vonalak akkor metszik egymást, ha a pontok megfelelnek a fundamentális mátrix által megadott epipoláris korlátnak. Egyes esetekben az epipoláris feltétel a mérési zaj (detektálási hiba, szenzor zaj, stb.) miatt nem teljesül, ezért a vetítési vonalak nem metszik egymást.

2.3 Képelemzés

A sztereo párosítás problémájának megoldása a keresztkorreláció, mely a képen kisebb-nagyobb területet párosít. Az egyik képen a kérdéses pont köré egy ablak jelölhető ki. A 9. ábra a keresztkorreláció elvét mutatja be. A másik képen a feltételezett ponthoz egy ablak választható. Az ablakokba eső képrészletek között korreláció számítható [21]. A keresztkorreláció definíciója f és g képek között a következő:

$$(f * g)(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t + \tau)dt \quad (6)$$



9. ábra: Keresztkorreláció elve [22]

A korreláció értéke maximálissá válhat az ablakok horizontális és vertikális tolásával. Ez a művelet időben és képpontok tekintetében párhuzamosan végezhető. Egy adott eltolás mellett a korreláció értéke maximális az ablakokba eső képrészletek között. A maximális értéknél az adott ablakok középpontjai egymásnak megfeleltethetők. Ez az adott képpárosítási probléma megoldása. A művelet a kép valamennyi pontjára elvégezhető.

Lényeges a korreláció során használt ablak megfelelő méretének megválasztása. Túl nagy ablak esetén átlagos illesztés nyerhető. Kis ablakméret választásakor a másik képen több helyen található jól korreláló képrészlet, amely hibás párosítást eredményezhet [21].

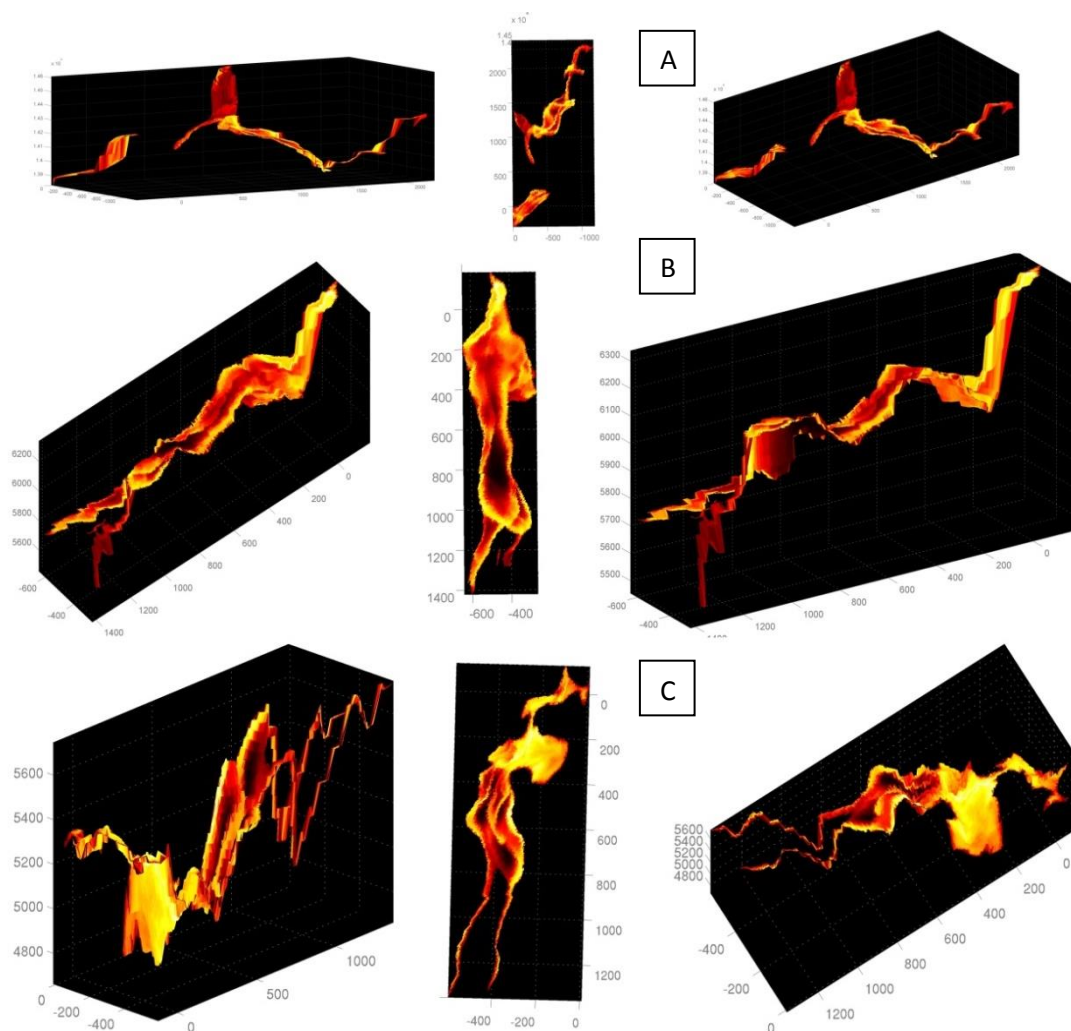
3. Eredmények

Az előzőekben ismertetett módszer tesztelése egy laboratóriumi, Bunsen-égő segítségével történt. Az égővel diffúziós lángot állítottunk elő, ami a 2. fejezet által adott kategóriák szerint kis sebességű, diffúz, lamináris-turbulens átmeneti láng, amelynek áramlását a felhajtóerő határozza meg leginkább. A láng áramlási képében jól felfedezhető volt a Kelvin-Helmholtz instabilitás okozta periodikus, buborékoló mozgás.

Ebben a fejezetben a módszerrel kapott adatok helyességét és jelentését vizsgáljuk. A koordináták helyességének megállapításához egy aszimmetrikus lángot állítottunk elő a Bunsen-égő és egy ventilátor segítségével. Az adatok segítségével vizsgálható jelenségek bővíthetők mozgókép készítésével, ezért a Bunsen-lángról videofelvételt is készítettünk, amit elemeztünk a sztereo rekonstrukciós eljárással. Végül a használt összeállítással végzett sztereo kalibrálás okozta rekonstrukciós hibák mértékét ismertetjük.

3.1. Az elfűjt láng képe

A 10. ábrán a Bunsen-égő lángjának 3D rekonstruált képe látható.



10. ábra: Egy irányból fűjt lángok 3D rekonstruált képe [10^{-1} mm]

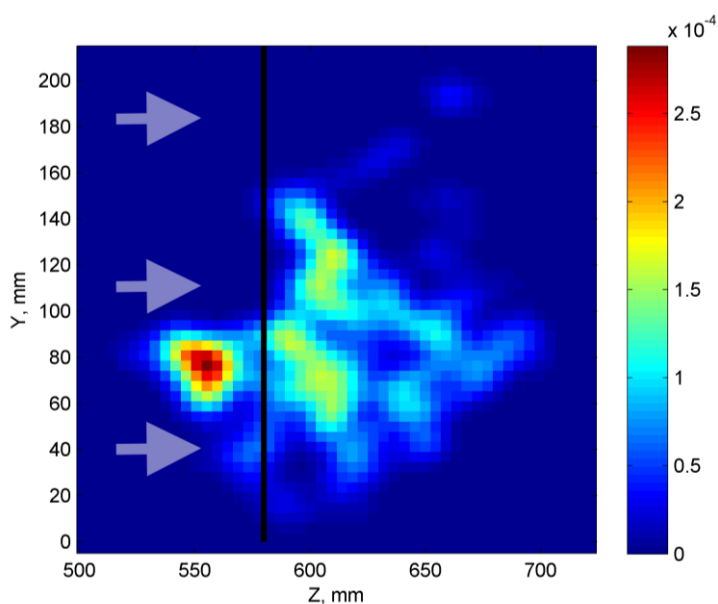
A turbulencia növelése céljából a lángot ventillátorral egy irányba fűvattuk, mellyel tesztelhető a 3D rekonstrukció helyessége – a mélység koordinátáknak a láng felületén az égő felszíntől felfelé haladva tartaniuk kell nagyobb z értékek felé, ez jelzi az elhajlást.

A 10. ábra alapján megállapítható, hogy a láng nagyjából egy irányba, a nagyobb z értékek irányába hajlik el. Ez azt sugallja, hogy a rekonstrukció legalább kvalitatívan helyes eredményt adott.

A 10. ábrán jól látható, hogy mennyire ráncolt a láng felülete, amit a nagy felbontású sztereo rekonstrukció jól visszaad. A kapott z értékek intuitívak az intenzitás tekintetében is.

A 3D képeken a láng felül és oldalnézetből látható. Az oldalnézeti ábrákon a láng helyzete kirajzolódik. A 10. A ábrán a láng oldalra, hátrafelé hajlik el. A 10. B ábrán lévő láng ehhez képest előreahajló. A 10. C ábrán a láng hátrahajló. A módszer alkalmas a láng térbeli helyzetének meghatározására. A felülnézeti ábrákon jól megfigyelhető a láng örvényszerű képe.

A 11. ábrán a lángfelület z koordinátáinak eloszlása látható az Y koordináta függvényében, 50 képpár feldolgozásából származó adatok alapján.



11. ábra: A lángfelület z koordinátáinak eloszlása az Y koordináta függvényében

A fekete vonal a Bunsen-égő kilépő szelvényének z koordinátáját jelzi. A fehér nyilak a ventillátorral előállított levegőáram irányát mutatják. A z koordináták az Y koordináták függvényében bivariáns sűrűségeloszlás-függvényként vannak ábrázolva.

Elhajló lángot feltételezve az égő felületétől haladva a z mélységkoordináták értéke nő. A 11. ábra alapján megfigyelhető, hogy a láng a növekvő z koordináták irányába dől.

Az ábra alapján látható, hogy a bemutatott sztereoszkopikus módszer reális (a kísérlet alapján várható) eredményeket adott.

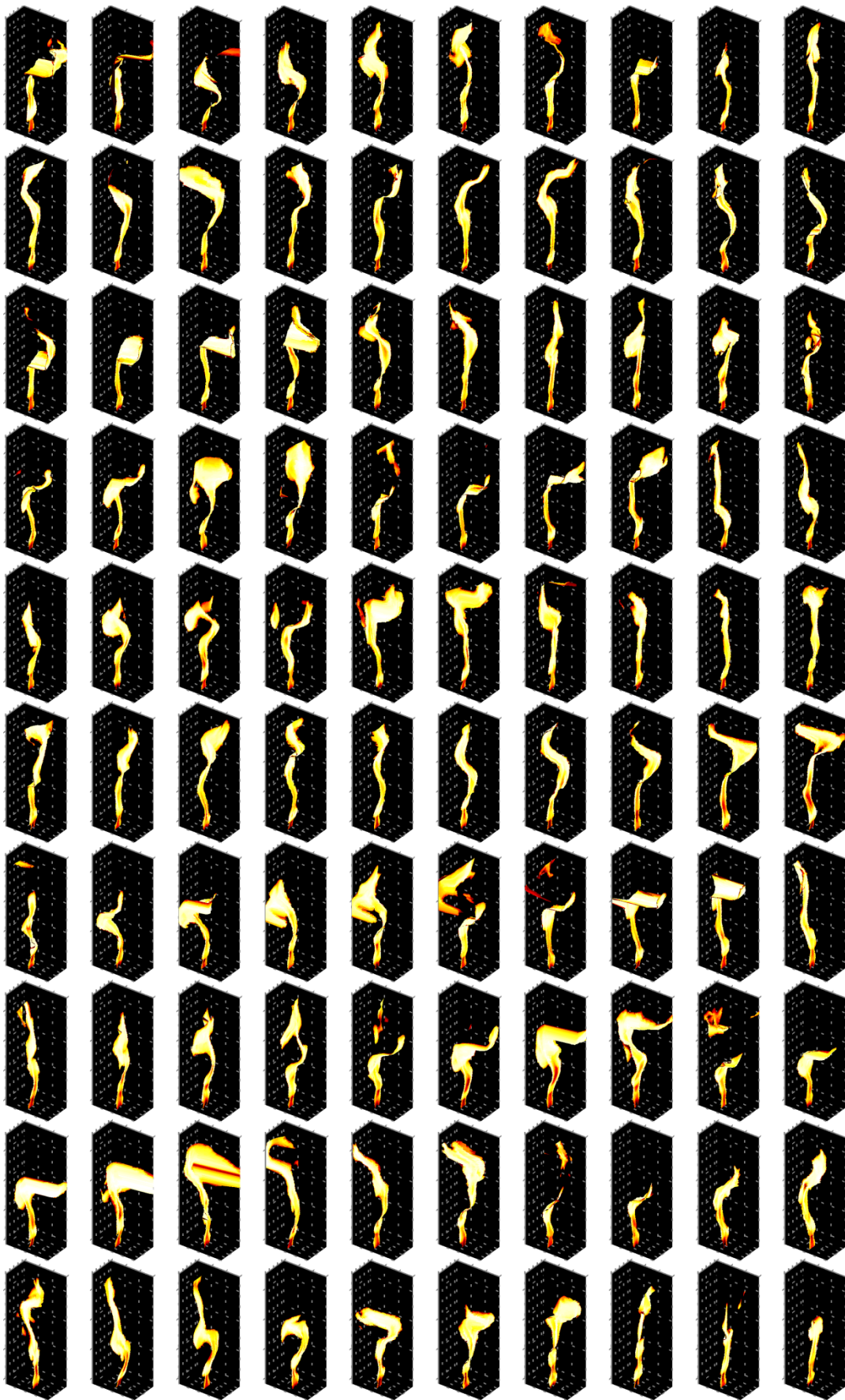
3.2. Videoelemzés

A 12. ábrán a Bunsen-égő lángjáról készített videofelvétel képei láthatóak. Az ábra 100 db képkockát mutat. A video 32 kocka/s sebességgel futott. Ezzel a felvételi sebességgel nyomon követhető a láng mozgása időben és térben. Az egymást követő képeken követni lehet, hogy mi történik a lánggal. Az ábra alapján belátható, hogy a láng a Kelvin-Helmholz-féle instabilitási, periodikus hullámszerű mozgást végezte.

Az égő gáz az instabilitás miatt helyenként leszakadozott. A video elemzés segítségével meghatározható voltak:

- a leszakadozások térbeli helyzete,
- a láng felületi deformációjának sebessége,
- a láng felületi görbülete,
- a láng felületi görbületének változása.

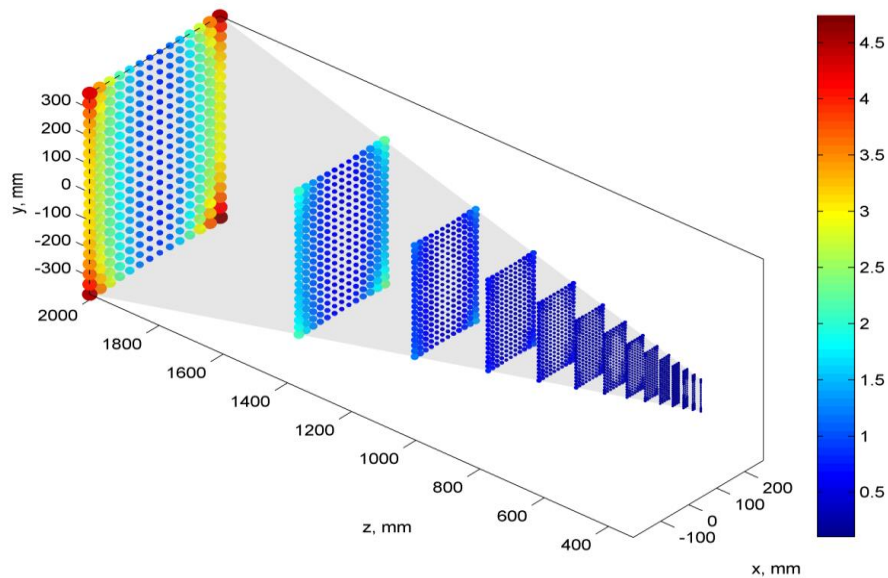
Mindezek összekapcsolhatók a turbulens méretskálákkal.



12. ábra: A Bunsen-láng videofelvételének 3D rekonstrukciója

3.3. Rekonstrukciós hibák

A rekonstruálás során hibák is jelentkeznek. A 13. ábra a rekonstrukció hibáinak standard szórását mutatja a tér koordináták függvényében. Az ábrán látható szürke rész az a teljes térrész, melyet a sztereokamera lát. A hibákat a színek jelzik.



13. ábra: A rekonstrukció hibáinak standard szórása a térkoordináták függvényében. A hiba mm-ben adott.

Megfigyelhető, hogy a sztereokamera látóterében a hibák száma a z mélységgel növekszik. A rekonstrukció pontosságát a bázistávolság meghatározza. A látómező a bázistávolság növelésével szűkül, de a rekonstrukció pontosabb. Csökkenésével a pontok megfeleltetése egyszerűbb, de a 3D rekonstrukció bizonytalanabb.

Összefoglalás

A 3D sztereografikus fényképezés segítségével a turbulens lángok felületi rekonstrukciója lehetséges. A módszer előnye, hogy 2D-s felvételek segítségével, sztereo kamerával meghatározhatók és vizsgálhatók a láng áramlástanai viszonyai.

A vizsgálat során rekonstruáltuk egy Bunsen-láng felületét. A láng magassága mintegy 15 cm volt.

A rekonstrukció hibája térbeli koordináta esetén 1,5 mm alatt maradt.

A rekonstrukcióval képet kaptunk a láng térbeli alakjáról, a láng felületének görbületéről. Videóképek segítségével képesek vagyunk vizsgálni a láng felületének térbeli mozgását.

A sztereografikus videoelemzés ígéretes eszköznek tűnik bonyolult alakú lángok áramlási viszonyainak vizsgálatára, azonban további vizsgálatok szükségesek annak megállapítására, hogy a kapott térbeli koordináták milyen fizikai információt hordoznak.

Irodalomjegyzék

- [1] Law, C. K. Laminar premixed flames, *Combustion physics* (2006) Cambridge, England: Cambridge University Press. p. 300
- [2] http://www.thermopedia.com/content/766/#FLAMES_TABLE1, 2014. X. 02.
- [3] Dr. Palotás Árpád Bence: Ipari tüzeléstechnika, Miskolc (2011) p.20-22, 28-29.
- [4] [http://www.itv.rwth.aachen.de/fileadmin/LehreSeminar/Technische Verbrennung](http://www.itv.rwth.aachen.de/fileadmin/LehreSeminar/Technische_Verbrennung) 2014. XI.03.
- [5] Pintér Ferenc: Általános fizika III. Atomhéjfizika, Dialóg Campus Kiadó (2003). pp.347–366.
- [6] Dr. Kapros Tibor: Hőtan, Miskolci Egyetem (2011) p.138-142, 155-164
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_radiation, 2014. XI.03.
- [8] Dr. Lajos Tamás.: Az áramlástan alapjai Budapesti Műszaki Egyetem (Áramlástan Tanszék jegyzete), Műegyetem Kiadó (1992), Budapest
- [9] M. T. Landahl; E. Mollo-Christensen (1992). Turbulence and Random Processes in Fluid Mechanics (2nd ed.). Cambridge University Press. p. 10.
- [10] Dt. Penninger Antal: Tüzeléstechnika, elektronikus jegyzet (2009), Budapest, p.132-133.
- [11] <http://ladqaat.web.elte.hu/folders/dinmet/dinmet3/Eload11.doc>, 2014. XI.04.
- [12] Dr. Bíró Attila: Tüzeléstan (kézirat), Miskolci Egyetem (1997), pp.93-94.,
- [13] T. Foat, K. P. Yap, and Y. Zhang: The Visualization and Mapping of Turbulent Premixed Impinging Flames, Mechanical Engineering Department, P O Box 88, UMIST, Manchester M60 1QD, UK
- [14] Qian Wang, Hua Wei Huang , Yang Zhang , Changying Zhao: Impinging flame ignition and propagation visualisation using Schlieren and colour-enhanced stereo imaging techniques, Fuel 108 (2013) pp.177-183.
- [15] A. González-Cencerrado , A. Gil, B. Peña: Characterization of PF flames under different swirl conditions based on visualization systems, Fuel 113 (2013) pp.798-809.

- [16] W.B. Ng , K.J. Syed , Y. Zhang: The study of flame dynamics and structures in an industrial-scale gas turbine combustor using digital data processing and computer vision techniques, *Experimental Thermal and Fluid Science* 29 (2005) 715–723.
- [17] Kató Zoltán, Czúni László: Számítógépes látás (2011) pp.34-36, 45-53.
- [18] <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15385-s06/lectures/ppts/lec-17.ppt>, 2014. XI.06.
- [19] Richard Hartley and Andrew Zisserman (2003). *Multiple View Geometry in computer vision*. Cambridge University Press
- [20] <http://www.inf.uszeged.hu/~kato/teaching/computervision/project1/calib.html>, 2014. XI.07.
- [21] <http://www.geier.hu/lila/KANDI/kandip.htm>, 2014. XI. 08.
- [22] <http://www.comp.nus.edu.sg/~cs4243/lecture/imageproc.pdf>, 2014. XI. 06.