



Háromdimenziós térrekonstrukció sztereo kamerarendszer segítségével

Reizinger Patrik (W5PDBR)

Konzulens: Kertész Zsolt

2018.05.09.

Tartalomjegyzék

Problémamegfogalmazás	3
Szakirodalmi áttekintés	3
Optical flow	4
Mozgás alapú sztereo (motion stereo)	5
Sztereo kamerarekonstrukció két kamerával	5
Sztereo rekonstrukciós algoritmus	6
Kamerakalibráció:	6
Epipoláris geometria:	7
Rektifikáció:	8
Reprojekció:	10
Implementáció	11
Hardveres megvalósítás:	11
Szoftveres megvalósítás:	12
Kalibráció:	12
Futtatás:	14
Értékelés, fejlesztési lehetőségek	15
Irodalomjegyzék	16

Problémamegfogalmazás

Különböző képfeldolgozási feladatok során gyakran kap központi szerepet a kamerakép(ek) alapján történő háromdimenziós térrekonstrukció, legyen szó robotikáról, önvezető autókról, drónokról vagy akár mérés technikai feladatokról.

A jelen dolgozatban tárgyalt megoldás egy virtuálisvalóság-rendszerhez fejlesztett kontroller relatív pozíciószabályozó algoritmusának ellenőrzése céljából került megvalósításra, melynek segítségével a periféria szenzorainak pontossága egyszerűen mérhető, s így lehetőség nyílik a korrekcióra. Ugyanis az általam megvalósítani kívánt virtuálisvalóság kontroller egyik legfontosabb jellemzője a flexibilis felhasználhatóság, vagyis a piacon elérhető megoldások döntő többségével ellentétben nem használ semmilyen abszolút referenciát a pozíció meghatározásához.

A felhasználási cél megváltoztatása nélkül, a fejlesztési folyamatot megkönnyítése jelentette jelen projekt számára a motivációt, ugyanis a rendelkezésre álló szoftveres eszközök, illetve algoritmikus háttér kompakt implementáció keretein belül teszi lehetővé a háromdimenziós rekonstrukciót képfeldolgozási megközelítésben.

A megfogalmazott probléma abból eredeztethető, hogy a képérzékelőre történő leképezés, a perspektív transzformáció során a mélységi dimenzió elveszítjük, lévén a kamera képrézeelője kétdimenziós érzékelést tesz lehetővé, így szoftveres megoldásokra van szükség ahhoz, hogy a rendelkezésre álló információk segítségével a mélységi információ visszanyerhető legyen.

Szakirodalmi áttekintés

Háromdimenziós rekonstrukciós feladatokra számos megközelítésmód, illetve algoritmus létezik, melyek mind hardverigényüket, mind pedig előnyeiket, ill. szűk keresztmetszetüket tekintve különbözőek, így a tervezési fázis során kiemelten fontos végig gondolni az optimalizálni kívánt metrikát.

Abból kifolyólag, hogy az egyes módszerek (legalább részben) különböző szakirodalmi háttérre támaszkodnak, így a következőkben egy rövid áttekintést követően a kiválasztott módszer részletes elemzésére kerül sor.

Optical flow

Az optical flow, másnéven optikai áramlás módszere segítségével egyetlen kamerával is végrehajtható a háromdimenziós térrekonstrukció. Ahhoz, hogy a módszer magját alkotó intenzitás-áramlás egyenlet, vagyis

$$I_t dt + I_x dx + I_y dy = 0,$$

ahol a t index az idő, míg x, y indexek az I intenzitásfüggvény térbeli deriváltját jelölik, teljesüljön, három korlátozó feltételt is figyelembe veendő:

- Egy adott (x_0, y_0) pont szürkességi szintjét időben (közel) állandónak kell lennie
- A követni kívánt objektum sebessége, vagyis dx , ill. dy abszolútértéke kellően kicsi – annak érdekében, hogy az intenzitás-áramlási egyenlet jelen formában felírható legyen, az ugyanis egy Taylor-soros közelítés magasabb rendű tagjainak elhagyásával fejezhető ki a fenti alakban, ennek elérése pedig csak kis abszolút értékű deriváltak esetében lehetséges
- Az azonos objektumokhoz tartozó pontok elmozdulása (közel) azonos

Azonban ezen feltételek kielégítése mellett sem egyértelmű a probléma megoldása., ugyanis az intenzitás-áramlás egyenlet aluldeterminált, a sebességgradiens két ismeretlen rendezője nem fejezhető ki egyértelműen egy egyenlet segítségével.

Habár a Lucas-Kanade-eljárás (illetve annak iteratív változata) megoldást jelent az aluldeterminált egyenlet megoldására, továbbra sem garantálja a három korlátozó feltétel teljesülését – így bár az optical flow több esetben kielégíthető megoldást jelenthet, azonban a többkomponensű algoritmikus alrendszer, amelyre szükség van a kielégítő, robusztus megoldás megtalálásához, nem teszi alkalmassá a vázolt feladat ellátására.

Jelen alkalmazásban szintén az optical flow ellen szól, hogy az algoritmus megfelelő textúrájú objektumok mozgásának detektálására alkalmas, amely a megoldani kívánt probléma esetén nem biztosított.

Mozgás alapú sztereo (motion stereo)

Rekonstrukciós eljárások esetén felhasználható annak ténye is, hogy amennyiben egy adott kamera, ill. a vizsgált objektum között relatív elmozdulás figyelhető meg, akkor az objektum képsíkra vetített mérete megváltozik, ami alapján következtethetünk az objektum távolságára.

A motion stereo algoritmus, habár felettébb egyszerű, ugyanis hasonló háromszögek segítségével történik a mélységi információ nyomon követése, azonban mivel jelen esetben kis elmozdulások követésére van szükség, numerikus instabilitást okozhat a kis elmozdulás-értékekkel történő leosztás, ugyanis a Z koordináta a következő formula szerint számítható:

$$Z = \frac{br}{D},$$

ahol b az ún. bázistávolság (mozgó kamera esetén a kamera elmozdulása), r a képsík optikai középponttól mért távolsága, míg D a diszparitás, vagyis a képpont képének két időpillanatban vett vetületének euklideszi távolsága.

A numerikus instabilitás mellett további problémát vet fel, ha az eljárást nem hagyományos módon (ti. a kamerát mozgatjuk) szeretnénk használni, ugyanis az objektum elmozdulása esetén a b paraméter ismeretlen, így alulhatározott lesz a formula.

Sztereo kamerarekonstrukció két kamerával

Az eddig bemutatott módszerekkel ellentétben a klasszikus sztereo alkalmazások több kamera képét, ill. a képek közötti eltérést, a diszparitást használják fel a mélységi információ visszanyerésére.

Ezek az eljárások általában nagyobb számításikapacitás-igénnyel rendelkeznek, azonban ennek következtében pontosabb, robusztusabb megoldást eredményeznek (adott körülmények között), így a rendelkezésre álló erőforrásoknak megfelelően meghatározható a kompromisszum pontosság-erőforrásigény dimenziókat tekintve.

A szakirodalom kínálta megoldási lehetőségek gyors áttekintését követően a kiválasztott két kamerás sztereo rekonstrukció módszerének részletes bemutatására kerül sor.

Sztereo rekonstrukció algoritmus

A mélységinformáció kinyerése érdekében egy több lépésből felépített eljárásra van szükségünk, melynek során a következő fázisok megvalósítására van szükség:

- Kamerakalibráció: a kamera torzításának kompenzálása
- Epipoláris geometria meghatározása: a két kamera között fennálló geometriai transzformáció kiszámítása
- Rektifikáció: a két kamerakép összetartozó pontjai megkeresését megkönnyítendő
- Sztereo megfeleltetés: a kamerák képeinek egymáshoz történő rendelése, a diszparitás kiszámítása
- Reprojekció: a diszparitás által meghatározott mélységinformáció segítségével a képsíkra projektált képpontok valós objektumpontokká történő transzformálása

Az algoritmus egyes lépéseinek bemutatása során jelentős mértékben hagyatkoztam az implementáció során használt OpenCV keretrendszer alaplíbráriájának számító kézikönyv¹ struktúrájára, ill. megfontolásaira.

Kamerakalibráció:

Az olcsó CMOS-szenzorokkal felszerelt kamerák elterjedésével egyidejűleg széles körben jelentkező probléma a kameraberendezések nemideális volta, a lencsék torzítása.

Alapvetően kétféle torzítási jelenséget különböztetünk meg, melyek mind jellegüket, mind pedig eredetüket tekintve jól elkülöníthetőek.

A radiális torzítás a lencse geometriájából adódó nemidealitás, ugyanis a matematikailag ideális parabolikus lencsékkel szemben a gyártási folyamatok során jóval egyszerűbben előállítható szferikus lencsék a lencse pereméhez közeli pixeleket jelentős mértékben torzíthatják.

A radiális torzítás megjelenési formája szintén kétféle, egyrészt lehet ún. hordótorzítás, ami a kép közepének relatív nagyobb mértékű megnyújtását eredményez, míg a párnatorzítás esetén éppen fordított jelenségnek lehetünk tanúi, vagyis a középső tartomány összenyomásának.

¹ Bradski-Kaehler 2008

Annak köszönhetően, hogy a radiális torzítás a képközéppontban 0, így jól közelíthető az origó körüli Taylor-sorral – itt ráadásul, figyelembe véve a szimmetriaviszonyokat, vagyis, hogy a torzítás szimmetrikus az origótól mért r távolságra, a sugárra, csak a páros hatványú tagokat kell figyelembe vennünk.

Ezek alapján a radiális torzítás korrekciós formulája a következő alakban írható fel:

$$x_{rad} = x_0(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)$$

$$y_{rad} = y_0(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6),$$

ahol a 0 index jelöli az eredeti, míg a *rad* index a radiális torzítástól korrigált képpontokat.

A tangenciális torzítás alapvetően a nem megfelelő minőségbiztosítási paramétereknek köszönhető, ugyanis ilyen jellegű torzítás tipikus kiváltó tényezője a nem megfelelően (pl. nem a lencse optikai tengelyére merőlegesen) rögzített képérzékelő szenzor.

A tangenciális torzítás két további taggal bővíti a torzítási tényezők vektorát, így összességében 5 paraméter kiszámítására van szükség pusztán a lencse, ill. a képérzékelő nemidealitása miatt.

Epipoláris geometria:

A kameraparaméterek korrekcióját követően szükség van a két kamera geometriáját összerendelő transzformáció meghatározására, melynek leírására az epipoláris geometria nyújtotta lehetőségek kerültek alkalmazásra.

Epipoláris geometria alatt a két kamera optikai középpontjai, illetve a leképezendő objektumpont által meghatározott geometriát értjük, mely három kitüntetett típusú komponenssel rendelkezik:

- Epipoláris sík: az optikai középpontok, valamint az objektumpont által meghatározott sík
- Epipoláris egyenes: a perspektív transzformáció következtében az egyik képérzékelőre leképezett objektumpont rekonstrukciója (annak képéből) a másik képérzékelőn egy egyenesként jelenik meg a mélységi információ bizonytalanságából kifolyólag
- Epipólus: adott optikai középpont másik képérzékelőre vetített képe

Nyilvánvaló, hogy a két kamera között található olyan transzformáció, amely az egyik kamera képét a másik kamera képébe transzformálja, ennek meghatározásához a rendelkezésre álló információktól függően több lehetőség adódik:

- Amennyiben a két kamera relatív helyzete (transzlációs, ill rotációs mátrixok, vagyis az *extrinsic paraméterek*), valamint a belső paraméterek (fókusz távolság, képközéppont) ismertek, akkor meghatározhatók az epipoláris egyenesek
- Amennyiben csak a belső (ún. *intrinsic*) paraméterek ismertek, akkor szükséges az extrinsic paraméterek meghatározása is, amely a két kamerakép közötti átjárást határozza meg (ez *essential matrix* néven ismert a szakirodalomban). Az essential matrix egy R forgatási, illetve egy S transzlációs mátrix szorzataként áll elő

$$E = RS$$

- Mind az intrinsic, mind az extrinsic paraméterek hiányában olyan transzformáció meghatározására van szükségünk, amely a világkoordináták és a pixelkoordináták között teremt kapcsolatot (köztes lépésként értelemszerűen a perspektív transzformációt is magába foglalva) – az ezen leképezést leíró mátrix *fundamental matrix* néven szerepel a szakirodalomban. A fundamental matrix tartalmazza az intrinsic paramétereket, így a fókusz távolságokat, ill. a képközéppontok koordinátáit.

$$F = \begin{bmatrix} -f_x & 0 & c_x \\ 0 & -f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rektifikáció:

A rektifikáció művelete az általános sztereo kamerapár, illetve a párhuzamos optikai tengelyű sztereo kamerapár közötti transzformációt írja le.

A rektifikáció előnye, hogy az összetartozó objektumpont-epipoláris egyenes párok összerendelése során egy szabadsági fok eliminálható, a rektifikált képeken ugyanis az epipoláris egyenesek vízszintessé válnak, vagyis a kétdimenziós megfeleltetési probléma egydimenzióssá egyszerűsíthető, ami számításikapacitás tekintetében jelentős megtakarítás – még azon megfontolások mellett is, hogy a rektifikációt minden képkockára végre kell hajtani, azonban a transzformáció leírására, a rektifikációs paraméterek meghatározására csak egyszer van szükség.

Ez az alábbi gondolatmenetet követve egyszerűen belátható: amennyiben adott egy $N \times M$ dimenziós képkocka, akkor *worst case* esetben egy pixelhez $O(N \times M)$ összerendelési műveletet kell elvégezni (ahol N , jelöli a képsorok számát, M pedig az oszlopok számát), melynek számításikapacitás-igénye k elemszámú konvolúciós ablak esetében $O(k \times N \times M)$, míg a rektifikáció során ez $O(1)$ – *re* csökken (ez természetesen a leképés meghatározására nem teljesül, azonban a további képkockákra igen), ugyanis a rektifikáció eredménye egy lookup tábla (LUT), melynek segítségével könnyen elvégezhető a leképezés (amennyiben figyelembe vesszük az alkalmazott interpolációt is, akkor is nagyságrendileg kevesebb művelettel végezhető el a megfeleltetés).

A transzformáció meghatározása történhet Hartley² vagy Bouguet³ módszere alapján: míg előbbi előnye, hogy 7 képpár alapján már képes a rektifikációra, azonban az eljárás nem képes abszolút skála meghatározására, vagyis a közeli, de kis méretű, valamint a nagy méretű távoli objektumok között ez alapján nem lehet különbséget tenni.

Bouguet módszere esetében ezt a problémát sikerül eliminálni, az optimalizálandó célfüggvény ebben az esetben a reprojekciós hiba (minimum), illetve a közös képterület (maximum) – természetesen mindez nagyobb számításikapacitás mellett valósítható csak meg, vagyis a feladatnak során felmerülő kritériumok jelentős mértékben befolyásolják az algoritmus kiválasztását.

Eddig a pontig bezárólag meghatározásra került a diszparitás-térkép, ahhoz azonban, hogy megfelelő minőségű háromdimenziós rekonstrukciót tudjunk megvalósítani, további finomhangolásra van szükségünk, ugyanis a számított struktúra az esetek döntő többségében egy ritka, ráadásul zajjal terhelt mátrix. Ez többnyire abban nyilvánul meg, hogy a diszparitás-térkép jelentős része „lyukakkal” borított, vagyis érvénytelen adatot tartalmaz. Az ilyen jellegű probléma egy simító jellegű szűrővel, például a súlyozott legkisebb négyzetek (WLS, weighted least squares) módszerével kiküszöbölhető.

² Hartley 1998

³ Nem publikált (Camera Calibration Toolbox, MatLab)

A súlyozott legkisebb négyzetek módszere gyakran alkalmazott eljárás alacsony szintű képfeldolgozásban, alapvetően az intuíció mögöttese energiaalapú, vagyis adott tartomány energiaszintjének minimalizására törekszik, tehát

$$W = \operatorname{argmin}_W \{\beta(y - W^T x)^T (y - W^T x)\}$$

a W paramétervektort keressük a β helyfüggő súlyozóvektor jelenléte mellett, ami lehetővé teszi a lyukak betöltését a ritka mátrixban.

Reprojekció:

A sztereo megfeleltetés során meghatározott lookup táblával minden képkockára könnyedén számítható a diszparitás, azonban az így kapott $[x, y, \text{diszparitás}(x, y)]$ ponthármasokat vissza kell transzformálni a világkoordinátarendszerbe, amely egy újabb transzformációs mátrix, az ún. *reprojekciós mátrix* (Q) segítségével tehető meg – Q pl. a jelen feladatban alkalmazott Bouguet-algoritmus során előáll, így az implementáció során ennek kiszámítására külön nem kell figyelmet fordítani.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_x} & \frac{c_x - c_x'}{T_x} \end{bmatrix}$$

Q tehát tartalmazza egyrészt a bal kamera intrinszc paramétereit, továbbá a jobb oldali kamera képközéppontjának x koordinátáját a jobb oldali kamera koordináta-rendszerében (c_x' , amely rektifikált sztereo kamerapár estében megegyezik c_x értékével), illetőleg a kamerák közötti translációs vektor x koordinátáját (T_x), ami a két kamera optikai tengelye közötti távolság.

Q ismeretében az $[x, y, \text{diszparitás}(x, y)]$ ponthármas egy mátrixszorzás segítségével transzformálható vissza a világkoordinátarendszerbe.

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix}$$

Amely formulában d az x, y pontpárhoz tartozó diszparitásértéket jelöli. Az így kapott homogén koordinátarendszerből három dimenzióba a homogén koordinátarendszerek konvenciójának megfelelően, vagyis a W koordinátával történő, koordinátánkénti leosztással transzformálhatjuk az adott pontot, vagyis

$$P = \begin{bmatrix} X/W \\ Y/W \\ Z/W \end{bmatrix}.$$

Implementáció

Jelen fejezet a hardveres, illetve a szoftveres megvalósítás részleteit mutatja be, kitérve az adott feladat specifikus tényezőire.

Hardveres megvalósítás:

Az első alfejezetben a rendszer hardveres sajátosságai kerülnek ismertetésre. A feladat során használt sztereo kamerapár a Logitech C270-es típusszámú, 720x480 pixeles felbontású modellje volt.

Ez a webkameratípus fixfókuszos kialakítású, csatolófelülete USB2.0, így reálisan 30 FPS (*frame per second*, képkocka/másodperc) az elvárható adatátviteli sebesség.



1.ábra: a sztereo kamerapár kialakítása

A két webkamera egy háromlábú kameraállványra került rögzítésre, az ehhez szükséges keresztartót 3D-nyomtatóval került elkészítésre, a mechanikai terveket pedig az Autodesk cég Inventor 2018 programjában terveztem meg. A kialakítás alapvetően párhuzamos tengelyű kamerapárhoz lett tervezve, természetesen azonban az emberi szem modelljének megfelelő, néhány fokos párhuzamos tengelytől való eltérés is megvalósítható.

Szoftveres megvalósítás:

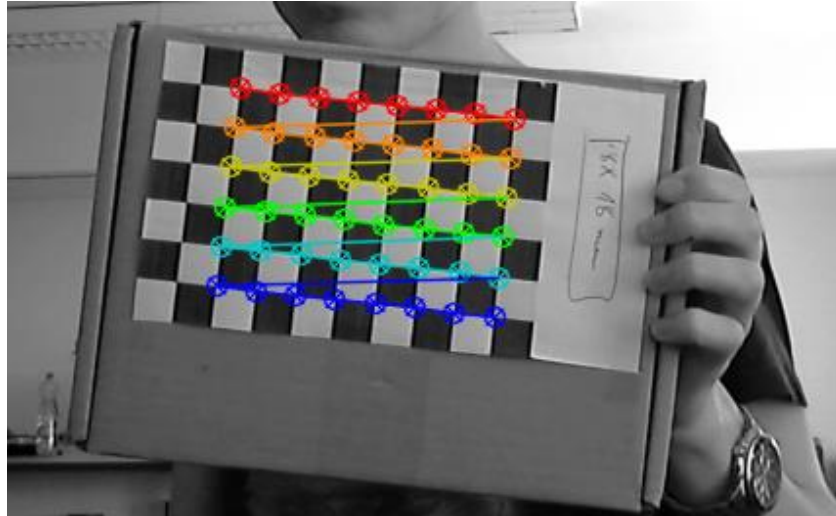
A korábbiakban ismertetett algoritmusokat Python nyelven implementáltam az OpenCV nyílt forráskódú, elsődlegesen gépi látásra, képfeldolgozásra optimalizált függvénykönyvtár Python nyelvhez készített wrapperének alkalmazásával.

A program alapvetően a parancssoron keresztül biztosít interfészt a felhasználó számára, a következő beállítások érhetők el:

- Kalibráció indítása
- Biztonsági kapcsoló az újrakalibrációhoz, így véletlenül nem törölhetők a korábbi kalibráció eredményei
- A tesztábrák számának meghatározása kalibrációhoz
- Kapcsolók a futtatás során a különböző fázisok (rektifikált kép, diszparitástérkép, stb. megjelenítéséhez)

Kalibráció:

A kalibrációs folyamat alapját az OpenCV beépített, kifejezetten kalibrációs célokra implementált függvénye alkotja, amely képes adott méretű sakktáblamintázat felismerésére, a mintázat fizikai méreteinek megadása által pedig a kalibráció elvégezhető.



2.ábra: A kalibráció során azonosított sakktábla-sarokpontok megjelenítése

A kalibráció folyamata tehát felvételek készítése a kalibrációs mintázatról sikeres mintázatfelismerési peremfeltétel mellett. Kalibrációhoz azonban a kamerák által biztosított, pixel szerinti felbontás nem feltétlen elegendő – azonban az OpenCV rendelkezik a problémát megoldani képes, szubpixeles mintázat (pontosabban sarokpont, ez azonban a sakktábla esetében pontosan megegyezik a mintázatot jellemző karakterisztikus pontok halmazával) meghatározó algoritmussal⁴, amely egy megválasztott kezdeti érték környezetében kiválasztott pontokból alkot egyenletrendszer

$$\langle \nabla I(P); P - Q \rangle = 0$$

alakban, amely egy P pontra vonatkoztatott szürkességi szintet jellemző gradiens, valamint a P és Q pontok közötti vektor skalárszorzata. Az egyenletről azért tehető fel, hogy a jobb oldal azonosan 0, vagyis hogy a gradiens és a két pontot összekötő szakasz merőlegesek, mivel ha P belső pont (egy homogén intenzitású tartományt tekintve), akkor az intenzitásgradiens 0, amennyiben pedig tartományhatárra, vagyis élre esik, akkor a P-Q vektor az éllel párhuzamos, míg a gradiens arra merőleges.

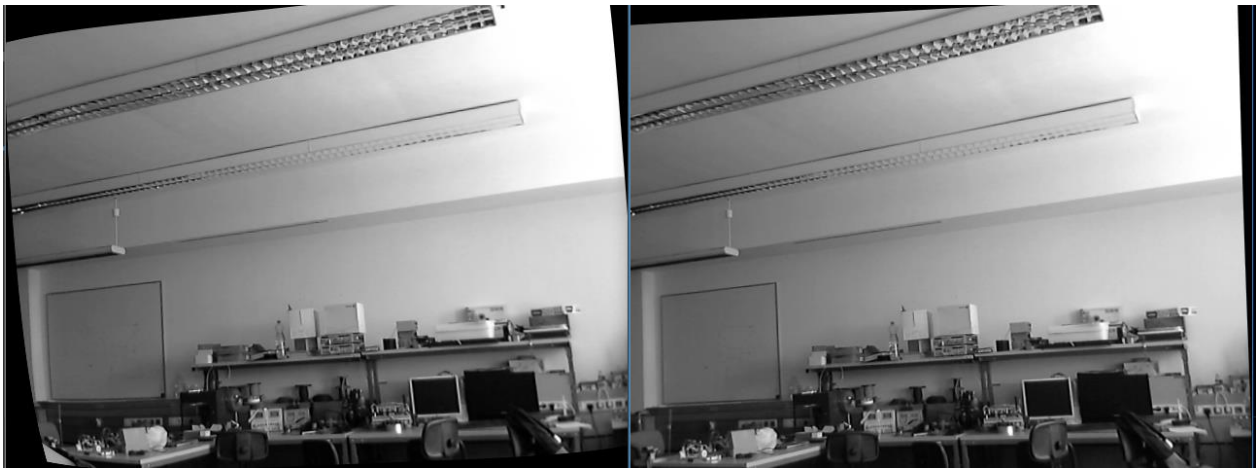
A rögzített képek alapján először külön-külön kameránként történt a kalibráció, majd ennek eredményét a sztereo kalibráció kiindulási értékeként felhasználva a szükséges kameramátrixok kiszámítása, majd végül a rektifikációhoz szükséges lookup tábla, ill. a Q reprojekciós mátrix

⁴ Lucchese-Mitra 2002

meghatározása, melyek a művelet végeredményeként .hdf5 formátumban mentésre kerülnek, hogy a későbbiek folyamán a futtatást megelőzően ne kelljen minden alkalommal végrehajtani a kalibrációt.

Futtatás:

A merevlemezre mentett kalibrációs paramétereket beolvasva, majd a rektifikációt elvégezve lépünk be a futtatás során megvalósított hurokba, melynek további feladata adott színű marker nyomon követése.



3.ábra: A rektifikált kameraképek, jól látszik, hogy a transzformáció eredményeként a széleken a transzformált kép nem tölti ki az eredeti képméretet

Ehhez az RGB képet HSL színtérbe konvertálom, mivel így adott színárnyalatra nagyobb megbízhatósággal lehet szűrni, révén az árnyalat, színtelítettség, megvilágítottság paraméterek.

A HSL-színtéren alapuló szűrés eredményeként visszacapott bináris maszk további finomítására morfológiai műveletek segítségével kerül sor, elsősorban a kisebb, zajnak tekinthető kisméretű objektumok eliminálására erózióval, majd lyukak kitöltésére zárással.

A feldolgozott maszkon belül az OpenCV beépített kontúrkereső rutinja segítségével a legnagyobb területű objektumon kívül az összes többi kiszűrésre kerül, az így megkapott markerobjektum köré téglalapot illesztve, majd annak középpontját kiszámítva egyetlen pontpárral jellemezni tudjuk a markert, illetve ezen pontkoordinátákkal a diszparitástérképbe indexelve vissza tudjuk állítani a

marker háromdimenziós pozícióját – ezen lépésnél természetesen érdemes valamilyen régióalapú kijelölést használni, és a mélységi információt konvolúciós ablakkal szűrni.



4.ábra: Diszparitástérkép, a háttér finom rajzolata külön kiemelendő, míg az előtérben a kézben tartott marker figyelhető meg (ebben az esetben is csökkent az effektív képméret)

Értékelés, fejlesztési lehetőségek

A kialakított, sztereo kamerapáron alapuló háromdimenziós rekonstrukciós keretrendszer a kalibrációs metrikát tekintve remek eredményekkel rendelkezik, az egyes kamerákra vonatkoztatott projekciós hiba (vagyis a kalibráció révén előálló mátrixok által a képsíkra transzformált, világkoordinátákkal rendelkező pontok és a kamerasíkon található képpontok átlagos négyzetes hibája) megfelelő számú (jelen esetben 15 darab) és minőségű kalibrációs ábra mellett 0.4 pixel alatti, ami a sztereo kalibráció hibájára is teljesülő felső korlát.

X, ill. Y irányban a módszer centiméter alatti pontossággal távolságtartó, a mélységi információt tekintve azonban, a kamerák nemideális voltából kifolyólag ennél nagyobb a bizonytalanság annak ellenére, hogy a diszparitástérkép kellő részletességgel rendelkezik.

Vagyis kijelenthető, hogy maga a diszparitástérképen alapuló háromdimenziós térrekonstrukció sikeresen megvalósításra került, a markerlokalizáció mélységi információját tekintve azonban további finomítások szükségesek a szűrés, ill. kalibrációs eljárás tekintetében.

Irodalomjegyzék

1. Bradski, G. – Kaehler, A. 2008. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. Sebastopol: O'Reilly Media
2. Hartley, R. I. 1998. Theory and practice of projective rectification. *International Journal of Computer Vision* 35 115–127.
3. Lucchese, L. – Mitra, S. K. 2002. Using saddle points for subpixel feature detection in camera calibration targets. *Proceedings of the 2002 Asia Pacific Conference on Circuits and Systems* 191–195