

Laserski 3D skener

Realizovan je skener sposoban da pomoću laserskog snopa skenira predmete i potom ih vizuelno reprodukuje u virtuelnom 3D prostoru u vidu mreže tačaka. Ovakav skener postiže relativno dobru rezoluciju koja se kreće od 1.6 do 4 mm, zavisno od opsega skeniranja. Realizacija uređaja je jednostavna i jeftina, a pomoću njega je moguće skenirati materijale različitih tekstura, ukoliko ne prelamaju ili ne odbijaju svjetlost (staklo, ogledalo i sl.). Skeniranje je nemoguće ako je osvjetljenje ambijenta prejako. Programski kod je kratak i efikasan, tako da je proces skeniranja brz.

Uvod

Trodimenzionalni skeneri, kao kategorija uređaja, služe kao most između stvarnog i virtuelnog svijeta. Danas postoji mnogo vrsta skenera, baziranih na najrazličitijim principima (laserski, ultrazvučni i sl.). Njihova podjela može biti izvedena prema različitim standardima.

Prva i najopštija podjela bi se mogla izvesti prema tome da li vrše samo planarno ili i trodimenzionalno skeniranje. Podjela na aktivne i pasivne skenere određuje da li skener vrši emisiju (svjetlosti, radio-talasa, itd.) na skenirani objekat, ili se koristi već postojećim uslovima ambijenta (Sunčeva svjetlost, itd.). Posljednja podjela koja će ovdje biti navedena je prema prirodi receptorskog dijela skenera. Monookularni skeneri koriste samo jedan receptor, dok binokularni imaju dva receptora (što im povećava preciznost, ali i cijenu).

Laserski 3D skener, o kome je ovde reč, je aktivni i monookularni skener. Generalno, ovaj skener se sastoji iz dvije cjeline. Prva, fizička cjelina je postavljena aparatura, dok je druga softver za obradu podataka dobijenih iz prvog dijela.

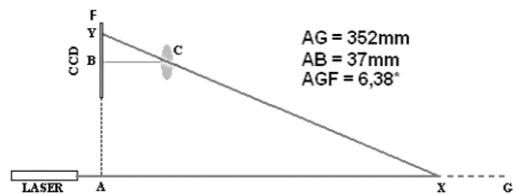
Opis aparature

Za konstrukciju prve cjeline neophodna su tri dijela: laserski emiter, senzor i rotirajuće postolje. Pored ova tri dijela, korišćeni su još neki u svrhu raznih poboljšanja.

Kao laserski emiter korišćen je helijum-neonski laser od 40 mW. Senzor je bila digitalna kamera sa dimenzijama CCD čipa od 4.8×3.6 mm i rezolucije 320×240 pxl. Korišćena su dva sočiva, jedno cilindrično i jedno bikonveksno. Treba pomenuti još i dva filtra – crveni i zatamnjeni, kao i rotirno postolje maksimalnog ugaonog pomjeraja od 180°.

Princip rada

Princip rada ovdje opisanog skenera, zasniva se na projektovanju vertikalne laserske linije na skenirani predmet koji se rotira na postolju. Ova linija se snima pomoću digitalne kamere i onda se dobijeni film dijeli na slike koje se kasnije softverski obrađuju.



Slika 1. Triangulacija – kamera, laser, sočivo i objekat su u tjemenu trouglova

Figure 1. Triangulation – the camera, laser, lense and object are in the vertices of the triangles

Velibor Simović (1987), Herceg Novi, Gomila bb, učenik 2. razreda Srednje škole "Ivan Goran Kovačić" u Herceg Novom

MENTOR:

Miodrag Đukić, student Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

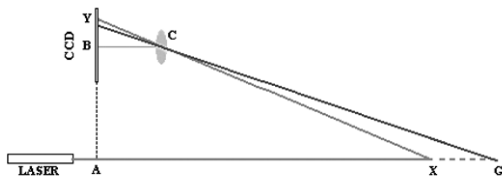
Aparatura je postavljena tako da se tri ključna dijela – kamera, laser i skenirani objekat, nalaze u tjemenu pravouglog trougla AXY (slika 1).

Ovakva postavka aparature omogućava određivanje koordinate X metodom triangulacije.

Dužinu BC nije bilo moguće direktno izmjeriti zbog njenih minijaturnih dimenzija i činjenice da je na upotrebljenom modelu kamere sočivo C bilo fiksirano. Da bi se ovo izvelo, potrebno je bilo na postavljenoj aparaturi izmjeriti dužine XY i BY i onda izračunati BC koristeći sličnost trouglova AXY i BCY :

$$BC = (AX \times BY) / AY = 36.5 \text{ mm}$$

Drugu cjelinu skenera čini softverski dio – program napisan u Visual Basicu. Film dobijen snimanjem, dijeli se na slike i svaka od njih se posebno obrađuje. Iz svake slike se pronalazi X koordinata svih tačaka osvijetljenih laserskim snopom u datom trenutku. Prethodno opisana postavka aparature čini proračune veoma jednostavnim. Naime, cilj je odrediti razdaljinu XG jer ona predstavlja udaljenost tačke na ivici predmeta od njegove sredine, što je ujedno i X



Slika 2. Nulta pozicija laserskog zraka

Figure 2. Zero position of laser beam

koordinata te tačke. Ovo je postignuto mjerenjem odstupanja laserskog zraka koji se vidi u kameri od takozvane nulte pozicije, koja predstavlja poziciju slike laserskog zraka ako je udaljenost $XG = 0$ (slika 2).

Razdaljinu u pikselima između ose simetrije CCD čipa i slike laserskog zraka (tačka Y) ovaj softver određuje algoritmom koji se sastoji iz pet koraka. U prvom koraku, softver broji piksele sa lijeve strane slike i upoređuje njihovu boju sa referentnom vrijednošću. Kada dođe do piksela koji je obojen crvenom bojom, tj. većeg intenziteta od referentne vrijednosti, softver pamti njegov redni broj. Isti

proces se vrši i sa desne strane slike. Tokom drugog koraka, u softveru se prvo određuje širina laserskog snopa D pomoću formule:

$$D = 320 \text{ pxl} - (R + L) \quad (1)$$

A zatim pronalazi udaljenost njegove sredine od sredine slike:

$$BY [\text{pxl}] = R - 160 + D / 2 \quad (2)$$

D – širina snopa

R – broj piksela sa lijeve strane

L – broj piksela sa desne strane

Dobijenu veličinu BY sada treba pretvoriti u milimetre. Preračunavanje piksela u milimetre je izvedeno imajući u vidu da širina CCD čipa od 320 pxl iznosi 4.8 mm:

$$4.8 \text{ mm} / 320 \text{ pxl} = 0.015 \text{ pxl/mm}$$

Pošto su sada poznate dimenzije AY , BC i BY , iz sličnosti trouglova AXY i BCY moguće je pomoću proporcije odrediti dimenziju AX . Iz slike 2 je za određivanje tražene veličine XG potrebno samo od već poznate dimenzije AG oduzeti izračunatu dimenziju AX :

$$AX = (AY \times BC) / BY$$

$$XG = AG - AX$$

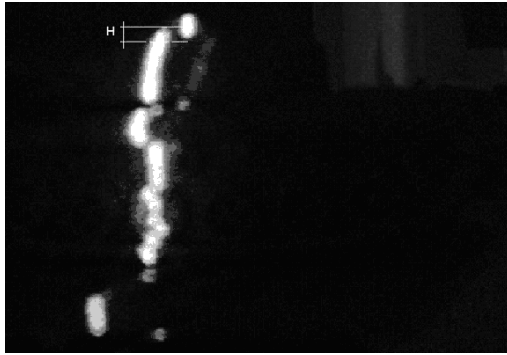
$$XG = AG - (AY \times BC) / BY \quad (3)$$

Ovako je određena koordinata X za jednu tačku laserskog snopa na slici.

U tački A nalazi se cilindrično sočivo koje razbija laserski snop u uspravnu liniju što omogućava skeniranje druge, Y dimenzije. Naime, pošto je u programu određena X koordinata jedne tačke predmeta, da bi se odredila njoj odgovarajuća Y koordinata bilo je potrebno odrediti udaljenost ove tačke od dna slike.

Za određivanje visine predmeta u stvarnosti, potrebno je znati žižnu daljinu sočiva. Recimo, ako je visina tačke na slici 140 pxl, iz formule (3) može se zaključiti da je njena visina na CCD čipu 2.1 mm. Znajući žižnu daljinu, koja je u ovom slučaju bila eksperimentalno određena, u kratkom algoritmu se određuje visina tačke u stvarnosti.

Treća, Z koordinata uvodi se u samom softveru. Svim parovima koordinata X i Y dobijenim obradom jedne slike, dodjeljuje se ista Z koordinata koja odgovara rednom broju te slike.



Slika 3. Pojava paralelnih zraka

Figure 3. Appearance of parallel beams

Tokom skeniranja zapažena je jedna pojava važna za preciznost skenera. Ako je na jednom mjestu na objektu velika razlika u ispučenosti površine (recimo prvo ide veliko ispučenje, a zatim odmah prelazi u udubljenje) pojavljuju se tzv. paralelni zraci. (slika 3)

Da bi se kod ovakvih slučajeva izbjegla zabuna i greške tokom izvršavanja programa, u programski kod je, pored tri niza rezervisana za pamćenje koordinata, uveden i tzv. alternativni niz. Naime, pri svakom računanju širine laserskog zraka, program provjerava da li je širina snopa D veća od 12 pxl. Mjerenja su pokazala da se širina snopa kreće od 7 do 11 pxl. Ako je D veće od 12 pxl, onda se definitivno radi o slučaju paralelnih zraka. U takvoj situaciji, program umjesto standardnog potprograma, koji radi po već opisanom principu (2), poziva drugi potprogram koji vrši operacije prikazane sledećim formulama:

– za lijevi (osnovni) zrak:

$$X = 160 - (L + 5 \text{ pxl}) \quad (4)$$

– za desni (paralelni) zrak:

$$X_1 = R - 160 + 5 \text{ pxl} \quad (5)$$

Ovaj potprogram treba da odredi udaljenosti sredina oba ova laserska zraka od sredine slike. Činjenica je da će uvijek kad se pojave dva paralelna zraka jedan od njih biti lijevo u odnosu na drugi. Udaljenost njegove sredine od sredine slike određuje se tako što softver broji piksele dok ne dođe do piksela osvijetljenog crvenom bojom, kome potom pamti redni broj kao promjenljivu L . Ova promjenljiva

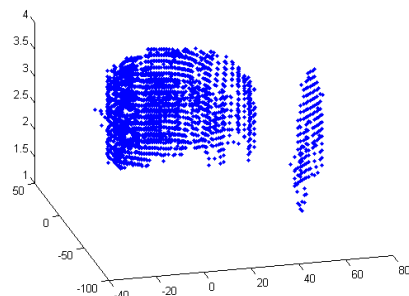
predstavlja udaljenost ivice prvog laserskog zraka od lijeve strane slike. Pošto nije moguće naći udaljenost njene suprotne ivice od sredine slike zbog prisustva drugog zraka, ovaj problem je riješen na drugi način. Pošto je srednja širina polovine laserskog zraka oko 5 pxl (što je eksperimentalno utvrđeno), ovaj potprogram dodaje taj broj piksela promjenljivoj L . Ovako je dobijena udaljenost sredine prvog laserskog zraka od lijeve strane slike. Da bi se dobila njena udaljenost od sredine slike, jednostavno se ovako dobijena vrijednost oduzme od 160 pxl, što odgovara širini polovine slike. Sličan proces se obavlja i za desni zrak.

Na ovaj način se u istoj horizontali dobijaju dvije X koordinate: jedna iz osnovnog zraka (X), a druga iz paralelnog (X_1). Prva se upisuje u niz namjenjen za X koordinatu, dok se druga smiješta u alternativni niz. Naime, ovaj alternativni niz uzima vrijednost 0 sve dok se ne pojavi slučaj paralelnog zraka, kada on uzima vrijednost koordinate X_1 .

Kada se ovako određene koordinate iscrtaju, one prikazuju teksturu skeniranog objekta u vidu ravni. Naime, pošto je proces skeniranja vršen dok se objekat okretao oko svoje ose, potrebno je sada ovu ravan sa teksturama rasporediti po krugu (umotati slično omotaču valjka). To se izvodi ubacivanjem Z i X koordinata u sledeće dvije jednačine:

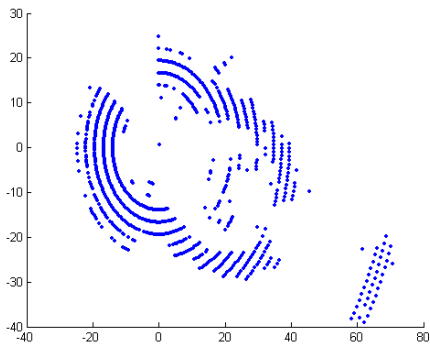
$$X = \sin X \quad \text{ i } \quad Z = \cos Z$$

Sve koordinate se upisuju u tri niza sa korespondentnim indeksima. Ovi nizovi se prosljeđuju programu napisanom u Originu koji pomoću njih iscrta tačke u prostoru.



Slika 4. Izgled flašice u 3D prostoru

Figure 4. Plastic bottle 3D image



Slika 5. Pogled na flašicu odozgo

Figure 5. Plastic bottle from above

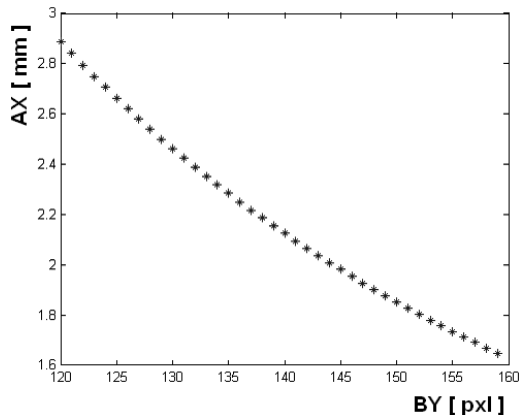
Rezultati ispitivanja

Rezultati dobijeni skeniranjem plastične flašice prikazani su na slikama 4 i 5.

Na slici 4 vidi se flašica formirana pomoću tačaka u 3D okruženju. Slika 5 pokazuje istu sliku posmatranu sa gornje strane.

Očigledno je da slike 4 i 5 ne odgovaraju u potpunosti izgledu flašice u stvarnosti. Ovo je prouzrokovalo prisustvo relativno velikih grešaka. Ove greške su, uglavnom, rezultat niske preciznosti mjernih instrumenata i skromnih dimenzija CCD čipa. Za mjerenje dimenzija AB i AG korišćen je klasični metar sa najmanjim podeokom od 1 mm. Iz ovoga slijedi da su ove dvije dimenzije izmjerene sa preciznošću od ± 0.5 mm. Greška koja najintenzivnije utiče na preciznost skenera pojavljuje se na dimenziji BY. Ako bolje pogledamo metod triangulacije na slici 1, ustanovićemo da je priraštaj dimenzije BY analogan priraštaju ugla AXY. Naime, priraštaj ugla AXY (a samim tim i priraštaj dimenzije BY) utoliko je veći ukoliko je dimenzija AX manja i obrnuto (slika 6).

Iz ovog grafika se vidi da pomjeraj od jednog piksela dimenzije BY neće uvijek biti prouzrokovan jednakim pomjerajem dimenzije GX. Naime, da bi se prouzrokovao pomjeraj BY od 159. do 160. piksela, potrebno je napraviti pomjeraj GX od samo 1.6 mm. Opet, ako se radi o pomjeraju BY od 120. do



Slika 6. Preciznost skenera u zavisnosti od položaja snopa na CCD čipu

Figure 6. Accuracy of the scanner depending on the position of the beam on the CCD chip

121. piksela, odgovarajući pomjeraj veličine GX će iznositi 2.9 mm, što je znatno više nego u prethodnom slučaju. Pošto je krajnji piksel na iskorišćenoj polovini CCD čipa 160. piksel, u njemu se vidi slika laserskog snopa samo onda kada je vrijednost AX minimalna. Logičan zaključak iz navedenog jeste da greška koju pravi ovaj skener, glavnim dijelom zavisi od vrijednosti veličine AX, a samim tim i od položaja slike laserskog snopa na CCD čipu: što je slika bliže kraju čipa, greška je manja. Očigledno da je za smanjenje ove greške ključna veličina CCD čipa.

Dimenzija BC nije neposredno mjerena, već preko dimenzija AX, BY i AY čija je greška u okviru ± 0.5 mm (osim za BY čija je greška 0.015 mm), što znači da greška u izračunavanju BC proizlazi iz grešaka ove tri dimenzije određuju veličinu relativne greške kod računanja dimenzije BC.

$$D(AX \times BY / AY) = |AX * BY / AY| * (dAX + dBY + dAY)$$

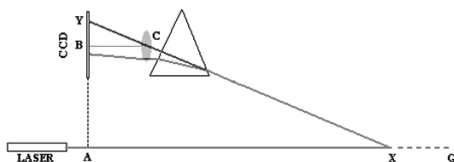
$$D(BC) = 0.2148 \text{ mm}$$

Diskusija

Da bi softver što preciznije obavio svoju ulogu, potrebno je bilo poboljšati kvalitet slika koje mu se prosljeđuju. Ovo je izvedeno korišćenjem dva metoda.

Zavisno od tipa površine skeniranog objekta, dobijena linija na objektu obično je slabog intenziteta. Ovaj problem riješen je povećavanjem kontrasta i osvijetljenja (brightness) u softveru kamere. Ovako je dobijena znatno intenzivnija linija, ali se pojačalo i parazitsko svjetlo iz ambijenta. Da bi se ovo svjetlo odstranilo, potrebno je staviti crveni filter ispred otvora blende na digitalnoj kameri. Filter neće uticati na laserski zrak, ali će ukloniti svo svjetlo koje nije u crvenom spektru. Zbog nedostataka cilindričnog sočiva, laserski zrak se u nekim tačkama nepravilno prelama tako da se dobija niz tankih zraka rasutih oko glavne linije. Uklanjanje ovih rasutih zraka izvedeno je pomoću zatamnjenog filtra. Ovo je neznatno smanjilo intenzitet glavne linije, ali je potpuno uklonilo neželjene zrake.

Preciznost ovog skenera je znatno umanjila činjenica da je sočivo C fiksirano i da jedna polovina CCD čipa ostaje potpuno neiskorišćena. Ovaj problem je moguće veoma lako i efikasno riješiti postavljanjem staklene prizme na mjestu i na način prikazan na slici 7.



Slika 7. Rješenje problema pomoću prizme

Figure 7. Solving the problem using a prism

Linijom AXY označena je putanja zraka bez prizme, a sa AXB zrak koji se lomi kroz prizmu. Ovo donekle mijenja funkciju zavisnosti BY od XG , ali uz odgovarajuću prizmu udvostručava preciznost skenera.

Zaključak

Ovaj skener raspolaze znatnom preciznošću i ima prilično jednostavnu konstrukciju. Zbog upotrebe lasera, prilično je nezavistan od osvijetljenja ambijenta, ali najveću preciznost ipak dostiže u uslovima smanjene vidljivosti. Iako je ovdje prikazano samo skeniranje predmeta na obrtnom postolju, jednačine se mogu prepraviti za slučaj da i sam skener rotira dok skenira okolinu. Iako je programski kod napisan u Visual Basicu, koji nije baš najpogod-

niji jezik za ovaj slučaj, zbog njegove kratkoće nije se javila potreba za daljom optimizacijom ili eventualnim prevođenjem na neki pogodniji jezik. Na kraju, ovako koncipiran laserski 3D skener će obezbijediti solidan "vid" bilo kojem robotu, mašini, itd.

Zahvalnost. Zahvaljujem se timu saradnika seminara elektronike (Dušan Grujić, Danica Pajović, Srđan Jovanović, Zdravko Pantić i Ljubomir Vračar), kao i profesoru fizike Zoranu Radojčinu na svesrdnoj podršci i nesebičnoj pomoći. Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru Miodragu Đukiću na strpljenju i profesionalnosti koje je pokazao pri recenziji ovog rada, kao i Dragiši Boci koji je doprinio optimizaciji softvera.

Literatura

- Landsberg G. S. 1967. *Optika*. Moskva: Nauka
- Božin B., Raspopović M., Danilović E. 2003. *Fizika za III razred gimnazije opšteg i prirodnomatematičkog smeru*. Beograd: Zavod za udžbenike
- Đukić M. 2000. Optoelektronski uređaj za 3D skeniranje objekata primenom metoda triangulacije. *Petičke sveske*, 51: 41

Velibor Simović

Trodimensional Laser Scanner

3D scanning of real objects using an optoelectronic setup consisting of a CCD chip with the appropriate optics, a laser beam mounted on an optical bench and a computer that runs a special program for data analysis was achieved. The scanned images in digital format (Figures 4 and 5) represent nets of characteristic dots of the scanned plastic bottle. The images have been made in a decent enough resolution (1.6–4.0 mm), and also depending on the range of the scanning. Hardware realization is inexpensive and efficient, and if there is not too much light around the object it is possible to scan all kinds of different materials with different textures – of course, except those which reflect light (glass, mirrors etc.). This particular kind of 3D laser-beam scanner can provide a good visual "sense" for a robot, machine etc.

