

PRILAGODLJIV MERILNI SISTEM NA PODLAGI PROFILA GLOBINE¹

Janez Perš¹, Peter Rogelj¹, Klemen Polanec¹, Viktor Zaletelj²,
Stanislav Kovačič¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
²Trimo, d.d.

E-pošta: janez.pers@fe.uni-lj.si

URL: <http://vision.fe.uni-lj.si>

POVZETEK: Članek opisuje sistem za brezkontaktno merjenje dimenzij lahkih gradbenih plošč s pomočjo 3D laserskega skenerja. Poseben poudarek je na protokolu za prilagajanje merilnega sistema različnim konfiguracijam meritev in različnim tipom izdelkov.

1. UVOD

Merjenje dimenzij je pri marsikaterem industrijskem izdelku pomemben del kontrole kvalitete. Obstaja več načinov izvedbe takšnega merjenja, pri čemer pa so vedno bolj v ospredju zahteve po 100% kontroli izdelkov. To v praksi ponavadi pomeni, da mora biti merjenje hitro, da mora čimmanj vplivati na proizvodni proces in mora zajeti čimveč kritičnih dimenzij. Eden primernejših načinov za izvedbo takšnega merjenja je brezkontaktni pristop z 3D skenerjem, ki nam poda globino vsake točke na opazovani površini. Iz takšnega globinskega profila je potem možno izračunati zahtevane dimenzije opazovanega izdelka.

1.1. Osnovna zgradba 3D skenerja

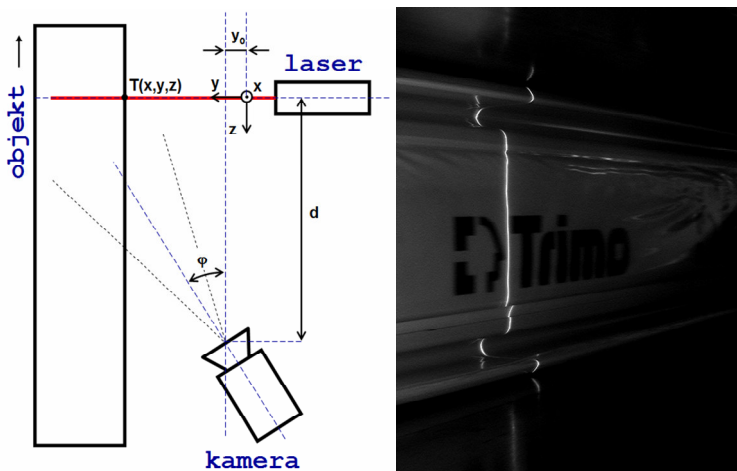
3D skener je ponavadi sestavljen iz ustrezno strukturiranega svetila (ponavadi laserja) ter detektorja, ki spremlja odsev svetila na opazovani površini. Pregled nekaj metod določanja globine s pomočjo lahko najdemo v [1].

V praktični izvedbi je ponavadi za doseganje zadovoljive natančnosti najprimernejša metoda merjenja globine s pomočjo *aktivne triangulacije*. Kot svetilo uporabimo laser moči nekaj mW, katerega svetlobni snop je z ustrezno optično napravo »raztegnjen« tako, da tvori ravnino v prostoru - projekcija takšnega svetlobnega snopa na idealno ravnino pa je povsem ravna daljica. To preoblikovanje laserskega žarka lahko dosežemo

¹ Raziskave, opisane v tem članku, so bile financirane v okviru projekta qSPAI - Quality control in the production line of sandwich panels with AI methods (EUREKA).

z uporabo ustrezne leče, ali pa s pomočjo vrteče zrcalne prizme (podobno kot v čitalcih črtne kode). Omeniti je treba, da drug način sicer v sistem vnese dodatno kompleksnost (mehanika, gibljivi deli), vendar je tako dobljena črta ponavadi bistveno bolj homogena od črte, dobljene z ustrezno lečo, in tako bolj primerna za avtomatsko obdelavo slike.

Drug pomemben del takšnega 3D skenerja je kamera, s pomočjo katere računalnik opazuje sliko, ki jo ustvari presek ravnine z opazovanim predmetom. Enega od načinov postavitve kamere in laserja [2] glede na objekt merjenja (izdelek) prikazuje slika 1.



Slika 1: Postavitev kamere in laserja (levo) in slika, ki jo vidi kamera pri takšni postavitvi (desno).

Sistem delovanja takšnega skenerja je razmeroma preprost: komponente sistema nastavimo tako, da bo slika laserskega žarka pri sredinski globini predmeta v sredini slike. Navidezni odmik žarka v levo ali desno je sorazmeren spremembi globine v točki predmeta, ki jo seka ravnina laserja. Ob znani geometriji kamere in laserja lahko približno izračunamo preslikavo pozicije slikovnih točk laserske črte v milimetre globine, točneje pa to naredimo s pomočjo kalibracijskega objekta znanih dimenzij.

Takšno postavitev izberemo, ko želimo razmeroma veliko merilno območje. V nekaterih primerih pa želimo večjo globinsko ločljivost, tudi na račun bistveno manjšega merilnega območja [3]. V tem primeru pozicijo kamere in laserja zamenjamo, tako da je kamera postavljena pravokotno na opazovano ravnino predmeta, laser pa je nameščen pod ostrim kotom. V tem primeru izkoristimo lasersko svetilo za optično ojačanje globine predmeta – že majhna sprememba globine se odrazi v bistveno večjem navideznem premiku laserske črte.

1.2. Merjenje dimenzij s pomočjo 3D globinskih senzorjev

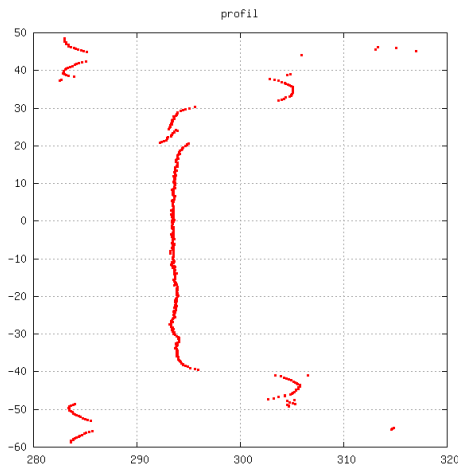
Na trgu lahko kupimo laserske skenerje v podobnih konfiguracijah, kot smo jo opisali zgoraj. A kljub relativno visoki ceni teh sistemov smo z nakupom 3D skenerja še daleč

od merilnih rezultatov: *tudi dobro kalibriran 3D globinski skener nam poda le globino vsake od točk pod skenerjem, meritve dimenzij pa moramo na podlagi globine načeloma šele izračunati*. V nadaljevanju članka ne bomo govorili o 3D skenerju in zajemu globinskih podatkov, ampak se bomo namesto tega posvetili nekaterim problemom ki se pojavljajo pri pridobivanju meritev iz globinskih podatkov, še posebej pa problemu prilagajanja merilnega sistema na različne tipe izdelkov.

2. MERJENJE DIMENZIJ IZ GLOBINSKEGA PROFILA

Odvisno od zasnove skenerja nam le ta daje profil globine v določenih intervalih. Če uporabljamo cenene kamere, to ponavadi pomeni en niz podatkov nekaj do nekaj deset krat na sekundo, v enem nizu podatkov pa je shranjena globina vseh točk na preseku laserskega žarka z opazovanim predmetom. Za zajem trodimenzionalnega profila (to je, globine točk na dvodimenzionalni ravnini) se mora torej predmet premikati relativno glede na 3D skener, in to v smeri, pravokotni na ravnino laserskega žarka.

V našem primeru (lahke gradbene plošče) imamo opraviti s predmetom, ki je v tej dimenziji bistveno daljši (»neskončno« dolg) in se zaradi tehnološkega procesa točno v tej smeri premika sam. Naš problem je tako zreduciran v 2.5 dimenzije – vsak niz podatkov nam predstavlja *oblak točk* (x,y), ki ležijo na predmetu vzdolž presečišča laserske ravnine z predmetom. Pri tem nam ena koordinata (x) predstavlja globino, druga (y) pa višino točke. Primer niza takšnih točk je prikazan na sliki 2.



Slika 2: Oblak točk, ki ležijo na površini izdelka, prikazanega na sliki 1. Ker je 3D skener kalibriran, so koordinate točk v milimetrih.

2.1. Uporaba večjega števila 3D skenerjev

Dimenzije izdelka včasih onemogočajo uporabo samo enega 3D skenerja. V tem primeru moramo dva ali več skenerjev namestiti tako, da merijo globino zanimivih

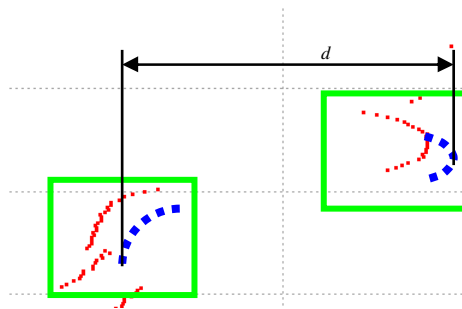
mest na izdelku, in izvesti medsebojno kalibracijo. Rezultat medsebojne kalibracije skenerjev so transformacijske matrike, ki nam podajajo transformacije iz lokalnih koordinatnih sistemov vsakega skenerja v skupni koordinatni sistem. To nam omogoča, da vse točke, ne glede na to, iz katerega skenerja izvirajo, preslikamo v isti koordinatni sistem. S tem rešimo tudi problem merjenja dimenzij, ki segajo od enega od drugega skenerja – ko so točke preslikane, jih enostavno zapišemo v skupni vektor in izvajamo meritve na enak način, kot da bi izvirale iz enega skenerja.

2.2. Merjenje dimenzij

Merjenje dimenzij iz globinskega profila poteka na naslednji način:

- Program mora najti značilne točke na izdelku in točno določiti njihovo pozicijo
- Iz pozicij značilnih točk mora izračunati merilne veličine (razdalje, kote, itd...)

Primer je prikazan na sliki 3. Odebeljeni kvadrati prikazujejo dve območji zanimanja. Algoritem se osredotoči samo na točke, ki ležijo znotraj teh dveh območij. Za vsako od področij mu podamo značilno obliko (predlogo, na sliki 3 sta predlogi prikazani kot črti, sestavljeni iz kvadratkov), ki najbolje opisuje idealno obliko globinskega profila na tistem mestu. Znotraj vsakega od območij z enostavnim optimizacijskim algoritmom poišče takšno pozicijo predloge, ki se kar najbolj prilega globinskemu profilu. Ena od točk, ki sestavljajo predlogo ima poseben status – predstavlja *izhodišče* predloge (na sliki 3 sta izhodišči predlog skrajno leva oziroma skrajno desna točka). Po prileganju predloge algoritem preračuna pozicijo izhodišča predloge v skupni koordinatni sistem, nato pa iz teh pozicij izračuna željen parameter - v primeru iz slike 3 gre za razdaljo med dnom in vrhom profila na plošči, ki je označena z d .



Slika 3: Pridobivanje meritev iz globinskega profila.

Za vsako od meritev, ki jih želimo izvesti mora torej algoritem poiskati eno ali več značilnih točk. Za vsako od značilnih točk mora poznati obliko predloge, ki jo prilega na globinski profil, poznati pa mora tudi območje zanimanja, da se lahko omeji na dovolj majhen odsek globinskega profila.

Vse te podatke lahko fiksno shranimo v algoritem, vendar je v tem primeru omejen le na določen nabor meritev in na določen tip izdelka, kar je v praksi prehuda omejitev.

2.3. Spreminjanje konfiguracije merjenja in tipa izdelka

Sprememba konfiguracije merjenja in tipa izdelka zahteva spremembo naslednjih parametrov algoritma:

- morebitnih nastavitev zajemanja (izbira skenerjev, nastavitev kamer, aktuatorjev, itd.),
- področij zanimanja za določitev značilnih točk,
- predlog značilnih točk, če imajo različni tipi izdelkov različne profile površine,
- algoritmov, po katerih se iz pozicij značilnih točk izračunajo parametri izdelka, ki jih želimo izmeriti (v primeru iz slike 3 gre enostavno za operacijo odštevanja x koordinat pozicij obeh predlog).

Medtem ko je možno prve tri tipe podatkov (nastavitve, področja zanimanja in predloge) enostavno zapisati v ustrezno formatirane nastavitvene datoteke, je zadnji problem bistveno težji. Izračun parametrov je načeloma sestavljen iz poljubnega zaporedja operacij nad pozicijami predlog (odštevanje, seštevanje, izračuni kotnih funkcij v primeru, da nas zanimajo koti), zato moramo dopustiti možnost, da uporabnik sistema to zaporedje definira sam.

2.4. Interpreter ukaznih datotek

Možnost definiranja kompleksnih izračunov smo izvedli tako, da nastavitvene datoteke interpretiramo kot zaporedje ukazov, ki se izvajajo v našem navideznem (virtualnem) stroju. Naš interpreter pozna nekaj strogo specializiranih ukazov, ki imajo v grobem naslednjo obliko:

UKAZ,IME,PARAMETER1,PARAMETER2,...

Vsak ukaz je zapisan v svoji vrstici tekstne datoteke, vrstni red ukazov je pomemben. Elementi ukaza so ločeni z vejicami. Prvi element vrstice je vnaprej določen niz, ki določa tip ukaza. Drugi element določa ime spremenljivke, v katero se bodo shranili rezultati izvajanja v tem koraku, sledijo pa od ukaza odvisni parametri.

2.5. Format ukaznih datotek

Na začetku datoteke je glava, ki potrdi, da je datoteka v pravem formatu, in posreduje merilni aplikaciji nekaj fiksnih nastavitev z ukazoma CAMERA in CROP.

CAMERA,<stevilka>,<x1>,<y1>,<x2>,<y2>,<gain>,<shutter>,<gamma>,<brightness>,<port>,<node>

CROP,<stevilka kamere>,<x1>,<y1>,<x2>,<y2>

Ukaz CAMERA vsebuje določitev, katera kamera naj se vklopi za merjenje tega izdelka, meje »področja zanimanja«, torej, izreza iz slike, na kateri je viden laserski žarek. Stavkov CAMERA je lahko več, in sicer toliko, kolikor je 3D skenerjev, mora pa biti vsaj eden. Številka kamere mora biti unikatna in se nanaša samo na eno kamero. Ko interpreter naleti na stavek stavek CAMERA, zajame eno sliko profilne črte, jo obdela, dobljene točke pa sestavi v enovit obris izdelka. Nastavitev izreza iz slike je pomembna zaradi tega, da program pravilno poišče sliko laserske črte, zato mora biti izbran tako, da v izrezu ni vidnih stvari, ki za merjenje profila niso pomembne (morebitni odboji, zunanji viri svetlobe). Stavki CROP niso obvezni. Z njimi so zapisane meje uporabnega področja slike v realnih koordinatah, nanašajo pa se na posamezne prej definirane kamere. Ti parametri se najprej pretvorijo v slikovne koordinate, nato pa se šele uporabijo za dodaten izrez slike.

Datoteka se nadaljuje z ukazi, ki se izvajajo v enakem zaporedju, kot so zapisani v datoteki:

SHAPE,<string ime>,<string smer>,<float xmin>, <float xmax>,<float ymin>, <float ymax>, <int N> ,<int resindex>,<float point1x>,<float point1y>,<float point2x>,<float point2y> <float pointNx>,<float pointNy>

Ukaz SHAPE sproži iskanje oblike v nizu točk, ki predstavljajo globinski profil predmeta. Z ukazom določimo območje zanimanja, predlogo (podano kot niz točk in kot indeks točke, katere pozicija naj predstavlja rezultat prileganja predloge na profil). Po izvedbi ukaza SHAPE naš interpreter »pozna« novi dve spremenljivki, in sicer IME.X in IME.Y, katerih vrednosti sta koordinati najdene značilne točke.

CIRCLE, <string ime>,<string smer>,<float xmin>, <float xmax>,<float ymin>, <float ymax>, <float rmin>, <float rmax>

Ukaz CIRCLE je krajša in specializirana oblika ukaza SHAPE, saj išče krožne loke, rezultat pa sta pozicija centra in radij najdenega krožnega loka.

Naslednja skupina ukazov so računski ukazi, s katerimi izvajamo aritmetične operacije:

PLUS, <string ime>,<float param1>,<float param2>
MINUS, <string ime>,<float param1>,<float param2>
MULTIPLY, <string ime>,<float param1>,<float param2>
DIVIDE, <string ime>,<float param1>,<float param2>

Po izvršitvi teh ukazov interpreter pozna nove spremenljivke, ki so enake imenom, podanim za oznako ukaza, njihove vrednosti pa so enake rezultatom aritmetičnih operacij.

Tretja skupina ukazov so ukazi, ki določeno vrednost »proglasijo« za merilni rezultat. Edina načina, da katerokoli vrednost izvozimo iz našega virtualnega stroja, sta stavka **RESULT** in **ALARM**:

RESULT,<string ime>,<float param1>,<float param2>

Ta stavek povzroči, da se na izhodu merilnega sistema kot rezultat pojavi vrednost podana kot »param1«. Na primer, to pomeni, da se v preglednici, v kateri se arhivirajo

rezultati, pojavi stolpec z podanim imenom. Zadnji parameter določa dolžino FIFO medpomnilnika, v katerega se zapišejo trenutni rezultati. Če je dolžina večja od 1, se na izhodu sistema pojavljajo povprečja skozi celoten FIFO medpomnilnik namesto »surovih« rezultatov, s čimer lahko zmanjšamo šum pri parametrih, za katere je znano, da se počasi spreminjajo.

ALARM,<string ime>,<float param1>,<float min1>,<float maks1>,<float min2>,<float maks2>

Stavek **ALARM** določa, naj se ob parametru, ki odstopa iz podanih mej, sproži alarm. Stavek dopušča dve tolerančni območji (rumena in rdeča stopnja alarma).

Primer datoteke za merjenje ene od dimenzij gradbenih plošč, ki jih proizvaja podjetje Trimco:

```
PMD
1.2
# ime slike s profilom - to rabi samo designer/graficni vmesnik
FTWXY.BMP
CAMERA,0,0,0,639,479,0,0.001,0,0,0,0,0
# iscemo zgornji krog
CIRCLE,ZGORNJIKROG,LR,10,20,100,120,2,4
# iscemo spodnji krog
CIRCLE,SPODNJIKROG,LR,10,20,0,20,2,4
# izracunamo zgornji rob, profil gleda v levo
MINUS,ZGORNJIROB,ZGORNJIKROG.X,ZGORNJIKROG.R
# ... isto za spodnjega
MINUS,SPODNJIROB,SPODNJIKROG.X,SPODNJIKROG.R
# Izracunamo zamik med robovoma
MINUS,ZAMIK,ZGORNJIROB,SPODNJIROB
# Kot rezultat nas zanima samo zamik, ki naj bo oznacen kot »D«.
# Bufferira naj se zadnjih 5 vrednosti
RESULT,D,ZAMIK,5
# V kolikor rezultat D ni znotraj dovoljenih vrednosti, naj se proži
# alarm
# Meje za alarmiranje izven zelenaga obmocja naj bodo od -0.05 do 0.05
# Meje za alarmiranje izven zelenaga obmocja naj bodo od -0.1 do 0.1
ALARM,ALARM_D,D,-0.05,0.05,-0.1,0.1
```

3. ZAKLJUČEK

Predstavljen je bil prilagodljiv koncept merjenja dimenzij izdelkov na podlagi profilov globine, pridobljenih z 3D skenerjem. Sistem je zasnovan na podlagi interpreterja, ki v vsaki iteraciji merjenja interpretira celotno datoteko, od zajema slike do izvoza rezultatov. Ker je merjenje podano algoritmično, je takšen koncept izjemno razširljiv, po potrebi pa lahko dodamo nove ukaze (primer: kotne funkcije), ne da bi porušili združljivost za nazaj. Morebitne zunanje parametre (npr. znane parametre izdelka) lahko enostavno pripeljemo v naš koncept preko spremenljivk, ki jih interpreter nastavi še preden začne z interpretiranjem ukazne datoteke.

LITERATURA

1. S. Jain (2003), A Survey of Laser Range Finding. *Tehnično poročilo*, <http://cfa-www.harvard.edu/~thunter/papers/ee236a.pdf>
2. L. Lahajnar (2003), Optično merjenje dimenzij gradbenih plošč : diplomska naloga, *Fakulteta za Elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*.

3. M. Bovcon, F. Lahajnar, S. Kovačič (2001), Optično merjenje debeline integriranih vezij z metodami strojnega vida, *Zbornik desete Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2001*, Portorož, Slovenija, str. 301-304