

Algoritem lociranja zvarov na slikovnih vzorcih

Mitja Placer, Boštjan Murovec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: mitja_placer@yahoo.com, bostjan.murovec@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek opisuje algoritem za razpoznavo dvodimenzionalne pozicije zvarov na kompresorju hladilno-zamrzovalne naprave na podlagi računalniškega vida. Najprej je opisan sam postopek zajema slike (perspektiva, izbira tipa videokamere, osvetlitev), v nadaljevanju pa je predstavljen algoritem lociranja zvarov na zajetih slikah. S pomočjo množice poskusnih slik smo ugotovili, da smo razvili robusten, natančen in hiter algoritem, ki je lahko uporaben v industriji za izvedbo avtomatizirane kontrole zvarov.

Ključne besede: strojni vid, računalniški vid, obdelava slik, razpoznavanje vzorcev, nadzor kakovosti

Algorithm for locating solder joint positions on digital images

Extended abstract. This paper describes the first part of a research project whose goal is to fully automate the solder joint quality inspection process in the home appliances industry. Nowadays this is an operator-executed process with the aid of a filler gas sensor.

Within the first part of the project our task was to develop a computer vision-based algorithm for solder joint recognition on the kitchen refrigerator compressor to be used in practice. It should be robust, accurate, reliable and computationally un-intensive for being intended for execution on an affordable personal computer in a limited period of time.

The main issues copped with in our work were several. Firstly, a decision had to be taken about the type of the camera to be used for the task. We had to answer the question whether the capabilities of a low-cost black and white camera would be sufficient for an efficient solder recognition or should we use an advanced device with color capabilities. Secondly, the extremely important illumination problem had to be treated properly. We knew that with a properly chosen lighting we would avoid problems at later stages of recognition thus assuring a more effective and faster execution of the whole process. Thirdly, there was a need of developing an algorithm to locate the solder joints.

Empirical tests show that we succeeded in developing a robust, accurate and fast algorithm suitable for the use in the industrial environment.

Key words: machine vision, computer vision, image processing, pattern recognition, quality control

1 Uvod

Kontrola kakovosti izdelkov je področje, ki je zelo primerno za uporabo robotov majhne nosilnosti, še posebej če je delovno območje omejeno. Ni jim namreč treba premikati težkih bremen, saj je njihovo orodje najpogosteje senzor majhne mase [1]. Za takšen

primer gre pri raziskovalnem projektu, katerega del opisuje pričujoči članek: razvoj avtomatiziranega (robotiziranega) postopka popolnega nadzora kakovosti kompresorskih zvarov v industriji bele tehnike.

Ta se sedaj opravlja ročno na način, pri katerem operater vsak zvar vsakega kompresorja čim bližje in po čim večjem loku obkroži s senzorjem za polnilni plin. Če senzor opozori na prisotnost plina, se hladilnik izloči iz nadaljnega postopka proizvodnje in se preusmeri v popravilo.

To je za človeka sicer preprosto, vendar precej monotono opravilo, zaradi česar prihaja predvsem ob koncu izmene do površne kontrole, kar pomeni, da lahko niso zavrjeni pomanjkljivi izdelki, v našem primeru hladilniki ali zamrzovalniki, kar slabo vpliva na ugled blagovne znamke. Težavo skušamo odpraviti z uvajanjem sistema avtomatizirane kontrole kakovosti zvarov, ki ima naslednje zahteve:

- razpoznati zware na vseh cevkah, ki izhajajo iz kompresorja,
- ugotoviti prostorsko lokacijo zvarov,
- zagotoviti točnost lociranja na 5 mm,
- ugotoviti ravninski naklon osi cevke, na kateri je zvar,
- postopek razpoznave mora biti čim hitrejši in robusten.

Članek opisuje le prvi podsklop celotnega projekta in se omejuje na razpoznavo pozicije zvarov na digitalnih slikovnih posnetkih, kar vključuje naslednje podnaloge in zahteve:

- izbiro ustreznega postopka zajemanja posnetkov in izbiro tipa videokamere (črno-belega ali barvnega),

- postavitve ustrezne osvetlitve,
- razvoj čim hitrejšega, robustnega in zanesljivega algoritma razpoznavanja zvarov s točnostjo lociranja 5 mm.
- ugotoviti ravninski naklon osi cevke, na kateri je zvar.

Rezultati podsklopa, ki je nazorno razčlenjen v nadaljevanju, naj bi torej služili kot vhod v nadaljnje podsklope izvajanja avtomatizirane kontrole.

2 Zajem slike

2.1 Vidno polje

Za algoritme razpoznavanja slikovnih vzorcev je pomembno, da je na posnetkih, ki se uporabljajo pri razpoznavi, prisotnih čim manj motilnih (nepotrebnih) elementov. Prvi in najpreprostejši korak, s pomočjo katerega se tej zahtevi približamo, je, da vidno polje kamere do tolikšne mere zožimo, da so na sliki še vedno vsi za razpoznavo nujni elementi skupaj z najmanjšim nujnim obsegom okolice, ki ga narekuje negotovost pozicije kompresorja na sliki. S tem v največji meri izkoristimo ločljivost kamere, saj zajamemo le manjši in najpomembnejši del objektov. V nasprotnem primeru bi se namreč velik del razpoložljive informacije nekoristno porabil za zajem nepotrebnih okoliških predmetov.

Tako lahko za naš primer že z uporabo videokamere nizke ločljivosti 640×480 slikovnih elementov dobimo ob slikanju 30 cm širokega iskalnega območja več kot zadovoljivo dejansko ločljivost \mathcal{R} (enačba 1), s čimer zmogljivost strojne opreme zadosti zahtevi po točnosti 5 mm:

$$\mathcal{R} = \frac{h}{\mathcal{R}_H} = \frac{0,3 \text{ m}}{640} = 0,5 \text{ mm}, \quad (1)$$

kjer pomenita h širino vidnega polja videokamere pri izbrani perspektivi in \mathcal{R}_H vodoravno ločljivost videokamere. Ker so slikovni elementi kvadratni, velja analogno za navpično dimenzijo.

2.2 Glajenje slike in postavitve videokamere

Da bi se znebili nepomembnih podrobnosti, šuma in ker smo imeli na voljo le en vzorec hladilnika, smo se odločili sliko gladiti s pomočjo ročne nastavitve ostrine kamere [3]. Tako smo se izognili programskemu glajenju in s tem prihranili na računskem času.

Vse posnetke smo zajemali brez stativa, da bi se čim bolj približali resničnim razmeram, ko je hladilnik na tekočem traku do določene mere naključno postavljen.

2.3 Izbira tipa videokamere

Vsi barvno neizraziti elementi se pri zajemu s črno-belo videokamero bistveno ne spremenijo: kompresor, ohišje hladilnika in napajalni kabel. Bistveno spremembo lahko opazimo le na kompresorjevih cevkah, ki iz izstopajočega elementa žive bakrene barve preidejo v odtenek ustrezne sive barve in se skoraj zlijejo z ozadjem. To je pomembno dejstvo, ki bi v nadaljevanju zelo oteževalo razpoznavo, saj so vsi iskani zvari postavljeni ravno na bakrenih cevkah. Zaradi tolikšne izgube informacije bi se bilo treba zateči k uporabi dodatnih programskih postopkov že pri predobdelavi slike in tudi pozneje [3], kar bi se nedvomno poznalo v povečanem računskem času in vprašljivi robustnosti.

Na podlagi omenjenih ugotovitev smo prišli do sklepa, da uporaba črno-bele videokamere ni primerna za izvedbo zastavljenega cilja, zlasti zaradi vprašanja robustnosti in pričakovane računske potratnosti postopkov, ki bi bili zasnovani na uporabi črno-belih slikovnih vzorcev.

3 Osvetlitev

3.1 Vrsta izvora osvetlitve

Učinkoviti sistemi za razpoznavo vzorcev v industriji nujno potrebujejo nespremenljive svetlobne razmere (barvno temperaturo, svetlobno jakost in smer vira osvetlitve), ki jih omogočajo svetlobno izolirane delovne celice z lastnim virom osvetlitve. Svetlobnih virov, ki se uporabljajo pri realizaciji sistemov računalniškega vida, poznamo več vrst [2]. V našem primeru smo uporabljali visokofrekvenčno fluorescentno cev, ki proizvaja močno in homogeno svetlobo konstantne barvne temperature in jakosti. Poleg tega je v veliki meri neobčutljiva na omrežne motnje, zaradi česar je slika, ki jo zazna videokamera, zelo stabilna [2].

3.2 Postavitev vira osvetlitve

Ker so zvari sami po sebi težko opisljivi, saj so povsem različnih barv, smo se odločili, da jih bomo poskusili razpoznati s pomočjo cevk, na katerih ležijo. Te namreč s svojo nasičeno bakreno barvo močno izstopajo iz povsem akromatične okolice. Zato je treba vir osvetlitve postaviti tako, da opisana lastnost pride čim bolj do izraza in olajša razpoznavo cevk.

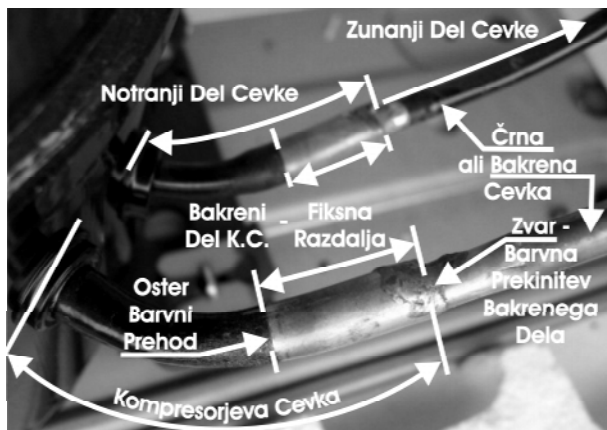
Za ločitev cevk od ozadja smo uporabili *HVS* barvno sito in poznejše postopke, temelječe na obdelavi njegovga izhoda, ki dajejo zaželeno rezultate le, če so cevke osvetljene vsaj približno simetrično glede na svojo os. Zagotoviti smo morali torej tako osvetlitev, da je vir postavljen pod najmanjšim mogočim kotom glede na os videokamere. Tej zahtevi smo se skušali približati s postavitvijo fluorescentne cevi čim bližje videokameri, kar se je izkazalo za učinkovit prijem.

4 Problematika iskanja zvarov

Naš cilj je razpoznati zware na bakrenih cevkah, ki izhajajo iz kompresorja hladilno-zamrzovalnega aparata. Samim zvarom težko določimo kakšno izrazito skupno lastnost. Največjo razliko vsekakor opazimo v njihovi obarvanosti, zato kakršnokoli razpoznavanje na osnovi te lastnosti odpade.

Edina izstopajoča skupna značilnost na mestih zvara je zožitev na prehodu iz kompresorjeve cevke na zavarjeno cevko, vendar se tudi ta pojavlja dokaj neenakomerno zaradi nanosa varilne mase, ki je lahko prisoten na eni ali obeh straneh zvara. Zaradi tega pojava bi bilo tudi razpoznavanje na podlagi iskanja zožitve na cevkah verjetno neuspešno. Tako smo spoznali, da si bomo z lastnostmi samih zvarov (barvo in obliko) težko pomagali.

Za vsako izmed cevk je v smeri iz kompresorja navzven značilen oster prehod iz kompresorjeve črne barve v barvo bakra. Nato po določeni razdalji (ta bakreni del je še vedno na kompresorjevem delu cevke) nastopi zvar, ki je lahko različnih barv, vendar je vedno od cevke dovolj kontrasten, da po vsej njeni širini vidno prekine barvo bakra. Za njim je zožen del cevke, ki je lahko ponovno bakren ali črne barve (slika 1).



Slika 1. Cevki z označenimi značilnostmi
Figure 1. Marked features of the pipes

Opisane lastnosti so skupne vsem cevkam in se med različnimi kompresorji ne spreminjajo, zato smo se jih odločili uporabiti v našem algoritmu razpoznavanja pozicije zvarov. Označena fiksna razdalja, ki na sliki 1 zaradi majhne oddaljenosti videokamere ni pri obeh cevkah enaka, postane pri snemanju z razdalje, določene v razdelku 2.1, skoraj enaka, vsekakor pa bistveno ne ogroža zahtevane točnosti 5 mm.

5 Algoritem lociranja zvarov

5.1 Omejitev iskalnega področja

Ker so cevke le majhen del zajete slike, saj veliko večino zasede kompresor (na sredini) in ozadje (spodaj in zgoraj), smo se, da bi pohitрили algoritem, odločili, da bomo iskalno območje omejili. V vseh postopkih v nadaljevanju smo tako uporabljali le dva izreza (za vsako stran kompresorja po enega) velikosti 250×230 slikovnih elementov, ki sta skupaj $2,67 \times$ manjša od prvotne slike s 640×480 slikovnimi elementi.

5.2 Pretvorba barvnega prostora in HSV barvno sito

Če je barva podana v zapisu (R, G, B) , kjer se vrednosti R , G in B nahajajo v intervalu med 0 in 1, lahko pretvorbo iz RGB v HSV barvni prostor opravimo s pomočjo naslednjih enačb, kjer pomeni MAX največjo in MIN najmanjšo izmed vseh treh komponent [5]:

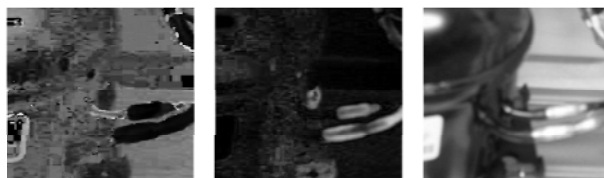
$$H = \begin{cases} \left(0 + \frac{G-B}{\text{MAX}-\text{MIN}}\right) \times 60, & \text{če } R=\text{MAX} \\ \left(2 + \frac{R-B}{\text{MAX}-\text{MIN}}\right) \times 60, & \text{če } G=\text{MAX} \\ \left(4 + \frac{R-G}{\text{MAX}-\text{MIN}}\right) \times 60, & \text{če } B=\text{MAX} \end{cases}$$

$$S = \frac{\text{MAX} - \text{MIN}}{\text{MAX}}$$

$$V = \text{MAX}$$

Rezultat dobimo v zapisu (H, S, V) , kjer je komponenta H izražena v stopinjah po barvnem krogu (med 0° in 360°), S in V pa sta v območju med 0 (za najmanjšo vrednost) in 1 (za največjo vrednost).

Rezultat pretvorbe vzorčne slike prikazuje slika 2, kjer je vsaka izmed komponent barvnega prostora HSV prikazana kot sivinska slika (svetlejša območja pomeni večjo vrednost komponente).



Slika 2. Sivinski prikaz H (levo), S (sredina) in V (desno) komponente pretvorjene slike
Figure 2. Grayscale images of the H (left), S (center) and V (right) component of the converted image

Sliki komponente H in S sta lep primer predstavitve uporabnosti takega zapisa slike. Bakrene cevke povsem izstopijo iz ozadja: komponenta H je zaradi njihove rdečkaste barve, ki je postavljena v začetno območje barvnega kroga, v primerjavi z nebarvito okolico zelo nizka, medtem ko je komponenta S zaradi nasičenosti

barve bakra zelo visoka. To ugotovitev smo se odločili uporabiti pri izvedbi barvnega sita v barvnem prostoru *HSV*.

Po preskušanju vrednosti vseh treh barvnih komponent barvnega prostora *HSV* na celotni površini vseh treh cevk na večjem številu zajetih slik smo določili naslednje intervale posameznih komponent, v območju katerih se nahaja večji del bakrenih cevk:

- *H* komponenta med 0 in 0,1,
- *S* komponenta med 0,28 in 1,
- *V* komponenta med 0,7 in 1.

Dobili smo barvno sito *HSV* s svojimi omejitvami, ki se pokažejo še posebej tedaj, ko pride do morebitnih odsevov, kot v našem primeru. Ko je namreč vir svetlobe postavljen dovolj blizu videokamere, lahko na osi cevk opazimo močno osvetljeno območje, ki povsem izgubi svoje prvotne barvne lastnosti, zaradi česar ga barvno sito ne razpozna kot del iskanega področja. Rezultat tega pojava je cevka, razdeljena glede na svojo os na dve polovici.

V razdelku 4 smo ugotovili, da zvar po vsej širini cevke prekine barvo bakra. To je ena bistvenih ugotovitev, na kateri bomo gradili nadaljnji algoritem. Osredotočili se bomo le na notranje bakrene dele cevk (tiste, ki so še del kompresorja) tako, da jih bomo povsem ločili od drugih elementov, jih združili, če bodo ločene po osi, in jim ugotovili značilke, s pomočjo katerih bomo določili pozicije zvarov.

Če želimo v nadaljevanju na čim lažji in čim robustnejši način najti bakrene dele kompresorjevih delov cevk, se moramo znebiti nepotrebnih elementov na binarnem izhodu barvnega sita. To so tista drobna območja na mestu zvara, ki ne pomenijo koristne informacije, utegnejo pa s svojo prisotnostjo motiti nadaljnje postopke. S tem namenom uporabimo morfološka operatorja, ki sta opisana v nadaljevanju.

5.3 Morfološka operatorja erozija in dilatacija

Ob uporabi erozije na binarni sliki dobimo na izhodnem slikovnem elementu ničlo, če je katerikoli izmed okoliških slikovnih elementov (definiranih s strukturnim elementom) enak nič, pri dilataciji pa dobimo na izhodnem slikovnem elementu enico, če je katerikoli izmed okoliških slikovnih elementov enak ena [4].

V našem primeru smo za erozijo uporabili strukturni element dimenzij 2×3 , sestavljen iz samih enic. Strukturni element dilatacije pa smo povečali za dva slikovna elementa v vsako dimenzijo zaradi želje, da bi prihajalo do združitve povsem blizu postavljenih objektov. Določitev večje vodoravne dimenzije obeh strukturnih elementov je posledica prilagoditve bolj vodoravni postavitvi cevk na sliki.

Rezultat uporabe morfoloških operatorjev je viden na sliki 3. Nepotrebni drobci so izginili in na mestu, kjer je bil stik med elementoma komaj opazen, je sedaj močna vez.



Slika 3. Izhod barvnega filtra (levo), rezultat erozije (sredina) in dilatacije (desno)
Figure 3. Output images of the color filter (left), erosion (center) and dilation (right)

5.4 Označevanje povezanih komponent

Za označevanje smo uporabili sekvenčni 8-sosedni postopek iskanja povezanih komponent [4]. Rezultat prikazuje slika 4, kjer je vsaka posamezna povezana komponenta predstavljena s svojo sivino.



Slika 4. Mogoča rezultata postopka iskanja povezanih komponent
Figure 4. Possible results of the connected-component labeling procedure

Upotevajoč dejstvo, da je vmesni cilj najti celotni bakreni del kompresorjevih delov cevk, prihaja pri označevanju do dveh različnih možnosti:

1. ko je bakreni del kompresorjevega dela cevke predstavljen z eno samo povezano komponento (slika 4 levo),
2. ko je bakreni del kompresorjevega dela cevke vzdolž osi razdeljen na dve povezani komponenti (slika 4 desno).

V drugem primeru je treba povezana elementa, ki pripadata istemu kompresorjevemu delu cevke, združiti oziroma označiti kot enega. To potrebujemo pri nadaljnjem izračunu merodajnih značilnosti (značilke) cevk, s katerimi natančno ugotovimo položaj zvarov.

5.5 Združevanje povezanih komponent

Iz postopka združevanja je treba izločiti poleg na sliki vedno prisotnih komponent zunanjih delov cevk (tiste, ki so za zvarom, gledano od kompresorja), tudi morebitne manjše delce, ki jih erozija ne bi dokončno izbrisala. Zato je treba vsem na sliki prisotnim povezanim komponentam izračunati značilke, ki bodo nosile potrebno informacijo za odločanje, katere izmed povezanih komponent bomo združili. Izbrali smo naslednje tri značilke: površino, površinsko središče in orientacijo (naklon glavne osi komponente).

Po izračunu značilk povezanih komponent na večjem številu slikovnih posnetkov smo ugotovili meje intervalov, v katerih se nahajajo posamezne značilke ali njihova razmerja, če povezani komponenti pripadata istemu bakrenemu delu kompresorjeve cevke:

- površina komponente mora biti manjša od 300 slikovnih elementov,
- X koordinati površinskih središč smeta biti postavljeni največ 10 slikovnih elementov narazen,
- Y koordinati površinskih središč smeta biti postavljeni največ 15 slikovnih elementov narazen.

Ti intervali so ustrezni le pri zajemanju posnetkov iz perspektive, opisane v razdelku 2.1.

Ko so intervali določeni, z njihovo pomočjo implementiramo konjunktivno sito. Vhodni podatek le-tega so vsi mogoči pari povezanih komponent na sliki, kot izhod pa dobimo seznam komponent, ki so združene v posamezne objekte.

5.6 Lociranje zvarov

Ker je prišlo ob združitvi povezanih komponent do sprememb značilk, je treba le-te pred nadaljevanjem ponovno izračunati. Da bi ugotovili, kateri izmed objektov so bakreni deli kompresorjevih cevk, smo ponovno sestavili konjunktivno sito, tokrat glede na naslednje intervale značilk:

- površina združenih komponent mora biti večja od 300 slikovnih elementov,
- če je cevka na levi strani slike, mora biti ostri kot med vodoravnico in glavno osjo objekta med 20° in 60° ,
- če se cevka nahaja na desni strani slike, mora biti ostri kot med vodoravnico in glavno osjo objekta med 0° in 30° .

Različni intervali kotov glede na položaj na sliki so posledica dejstva, da so cevke na kompresor pritrjene pod različnim kotom v odvisnosti od njihove lokacije.

Tako smo prišli do objektov, ki so v naslednji fazi izhodišče za iskanje zvarov, poleg tega ena od njihovih

na novo izračunanih značilk že pomeni rešitev postavljene zahteve po določitvi ravninskega naklona osi cevke, na kateri je zvar, saj nam orientacija objekta na bakrenem delu kompresorjeve cevke opisuje ravno to lastnost.

Za končno določitev pozicije zvarov smo uporabili postopek, po katerem določimo pravokotnico na glavno os cevke in jo premikamo po osi od površinskega središča objekta na bakrenem delu kompresorjeve cevke navzven (gledano glede na kompresor) proti zvaru, dokler ne dosežemo prve točke, v kateri pravokotnica z nobenim slikovnim elementom ne prekriva objekta na cevki.

Ker bi s tem določili pozicijo robnega dela zvara, dobljeni poziciji dodamo še 3 slikovne elemente v smeri proti zvaru, kar je upravičeno glede na to, da je razdalja bakrenega dela kompresorjevih cevk (in s tem širina zvara) fiksna (razdelek 4), ne glede na globinsko postavitev cevk. Do dodatka treh slikovnih elementov smo prišli izkustveno na podlagi proučevanja večjega števila slikovnih posnetkov. Ugotovili smo, da se s tako izbrano vrednostjo povsem približamo središču vsakega zvara na sliki. Zahtevo po točnosti 5 mm smo tako povsem izpolnili.

6 Sklep

Ocenjujemo, da smo prvi korak k popolni avtomatizaciji nadzora kakovosti kompresorskih zvarov v industriji bele tehnike uspešno opravili, saj opisani algoritem ugotavljanja pozicije zvarov iz slikovnih posnetkov deluje robustno in točno. Kljub naključnosti zajemalne perspektive, ki jo vnaša nepritrjena videokamera, se razpoznane pozicije zvarov v večini primerov ujemajo z dejanskimi središči zvarov, vsekakor pa se vedno nahajajo na njihovih dejanskih območjih.

7 Literatura

- [1] Mitsubishi electric industrial automation. www.mitsubishi-automation.com, 2004.
- [2] P. Waszkewitz C. Demant, B. Streicher-Abel. *Industrial image processing, visual quality control in manufacturing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [3] Nikola Pavešič. *Razpoznavanje vzorcev, uvod v analizo in razumevanje vidnih in slušnih signalov*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 2000.
- [4] B.G. Schunck R. Jain, R. Kasturi. *Machine vision*. McGraw-Hill, 1995.
- [5] A. Rosenfeld. *Digital picture processing*. Academic Press, Orlando, Florida, 1982.

Mitja Placer je diplomiral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Boštjan Murovec je diplomiral leta 1996, magistriral leta 1999 in doktoriral leta 2002, vse na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je sedaj docent.