

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

Houghova transformacija

Maja Šverko

Voditelj: *Siniša Šegvić*

Zagreb, travanj, 2009

Sadržaj

| | |
|--|----|
| Uvod..... | 1 |
| 1. Značajke Houghove transformacije..... | 2 |
| 2. Klasična Houghova transformacija..... | 5 |
| 2.1. Houghova transformacija za pravce..... | 5 |
| 2.2. Houghova transformacija za kružnice..... | 8 |
| 2.3. Houghova transformacija za elipse..... | 10 |
| 2.4. Pronalaženje prometnih znakova Houghovom transformacijom..... | 12 |
| 3. Generalizirana Houghova transformacija..... | 15 |
| 4. Pomoćne metode..... | 16 |
| 4.1. Izdvajanje rubnih elemenata..... | 16 |
| 4.2. Detekcija boje..... | 18 |
| 4.3. Smanjenje prostora parametara..... | 19 |
| 4.4. Izvajanje maksimuma iz akumulacijskog polja..... | 19 |
| 4.5. Narastanje područja u binarnoj slici..... | 20 |
| Zaključak..... | 22 |
| Literatura..... | 23 |
| Sažetak..... | 24 |

Uvod

Houghova transformacija je robusna tehnika procjenjivanja parametara temeljena na načelu glasanja. Patentirao ju je Paul Hough 1962. kao metodu određivanja orijentacije linija [3].

U računalnom vidu, Houghovom transformacijom pronalaze se parametri nesavršenih primjeraka zadane klase oblika. Isprva je korištena za detekciju ravnih linija, a kasnije je proširena i na neke kompleksnije parametarske oblike poput kružnica i elipsa. Generalizirana Houghova transformacija, koju je 1979. opisao D. H. Ballard, generalizirana je za detekciju proizvoljnih parametarskih oblika [2].

Prije same detekcije oblika obično se na slici uklanja šum i naglašavaju tražene informacije filtriranjem, detekcijom rubova ili nekim drugim metodama.

Primjerci klase oblika definiraju se n-torkom parametara. Svaki element slike (piksel) glasuje za parametre svih oblika kojem bi mogao pripadati. Glasovi se zbrajaju u akumulacijskom polju čija dimenzionalnost ovisi o broju parametara koji definiraju oblik. Traženi oblici se konačno pronalaze kao maksimumi tog polja.

U poglavlju 1 opisane su osnovne značajke Houghove transformacije, njezine prednosti i mane. Nakon toga, u poglavlju 2 opisana je klasična Houghova transformacija, to jest primjena Houghove transformacije za detektiranje parametarski definiranih krivulja te implementacija Houghove transformacije za detekciju prometnih znakova s crvenim obrubom. Generalizirana Houghova transformacija i neke njezine primjene opisane su u poglavlju 3. U poglavlju 4 opisane su neke metode koje olakšavaju primjenu Houghove transformacije poput detekcija rubnih elemenata, glađenja i izdvajanja maksimuma iz akumulacijskog polja.

1. Značajke Houghove transformacije

Houghova transformacija u osnovi obuhvaća tri koraka.

Prvi je korak pripremna obrada slike, to jest detekcija primitivnih elemenata oblika. Svi elementi slike ne sadrže jednako vrijedne informacije. Stoga se prije postupka glasanja elemenata slike u pravilu na slici naglašavaju korisne informacije. Točnije, na temelju nekih lokalnih značajki izdvajaju se elementi koji bi mogli pripadati oblicima koje se želi detektirati. Najčešće se pritom koristi detekcija rubova.

Drugi je korak transformacija slike u parametarski prostor. Svaki se od elemenata slike izdvojenih u prvom koraku preslikava u parametarski prostor predstavljen akumulacijskim poljem. Ako Houghovom transformacijom detektiramo pravce, akumulacijsko polje je dvodimenzionalno, no dimenzionalnost polja raste s rastom broja parametara koji definiraju traženi oblik. Preslikavanje parametara oblika u akumulacijsko polje ostvaruje se postupkom glasanja. Najjednostavniji postupak glasanja je povećavanje vrijednosti u akumulacijskom polju na mjestu čije su koordinate jednake paru (ili n -torci) parametara traženog oblika.

Treći i posljednji korak je detekcija lokalnih maksimuma. Rezultat drugog koraka je akumulacijsko polje u kojemu se lokalni maksimumi nalaze na koordinatama koje predstavljaju parametre traženog oblika. Najlakši način izdvajanja takvih maksimuma je izdvajanje svih vrijednosti akumulacijskog polja koje prelaze neku zadanu graničnu vrijednost. Zbog prisustva šuma i izobličenja oblika, sami se maksimumi mogu protezati i kroz nekoliko elemenata akumulacijskog polja, stoga se često koriste i metode za narastanje područja [1].

Houghovom transformacijom može se u isto vrijeme detektirati više oblika na jednoj slici. Svaki maksimum akumulacijskog polja koji se uzima u obzir odgovara n -torci parametara koji definiraju pojedini detektirani oblik.

Općenito razlikujemo dva oblika Houghove transformacije: *jedan prema više* ($1:m$) i *Više prema jednom* ($m:1$).

U obliku $(1:m)$ svaki karakteristični element (x,y) prostora slike pridružen je skupu m elemenata u parametarskom prostoru koji predstavljaju m mogućih oblika koji prolaze kroz element (x,y) . Ako se radi o detekciji pravocrtnih segmenata, u idealnom slučaju ovim se postupkom svaki pravocrtni segment sastavljen od n elemenata pridružuje točki (p, θ) koja u parametarskom prostoru ima vrijednost n .

U obliku $(m:1)$, m predstavlja broj elemenata potrebnih za jednoznačno definiranje parametarskog oblika. Za pravocrtnu segmente m je jednak 2 budući da su dvije točke dovoljne za jednoznačno definiranje pravca. Stoga, svaki par elemenata u prostoru slike pridružen je jednom elementu (p, θ) u parametarskom prostoru. Element (p, θ) određuje pravac koju u prostoru slike prolazi kroz obje točke. U idealnom slučaju pravocrtni segment u prostoru slike sastavljen od n elemenata slike pridružen je jednoj točki u parametarskom prostoru čija je vrijednost jednaka $(n(n-1))/2$ [1].

Jedna od ključnih prednosti Houghove transformacije je robusnost. Oblici na slici su zbog zamućenja, šuma, kuta snimanja ili sličnih smetnji rijetko potpuni prikazi oblika koje tražimo. Osim toga, prethodna obrada slike kojom se uklanjaju nepotrebne informacije na slici u pravilu uklanja i neke korisne informacije. Houghovom transformacijom mogu se pronaći oblici i onda kada je dostupno znatno manje od polovice slikovnih elemenata koji ih određuju. Zahvaljujući toj značajki, moguće je pronaći tražene oblike i kad su oni djelomično prekriveni, zamućeni ili samo dijelom izdvojeni u pripremljenoj obradi slike. Međutim, posljedica takve robusnosti je i velika vjerojatnost pronalazjenja malih nasumičnih struktura [5]. Takvu neispravnu detekciju može se spriječiti ili umanjiti pažljivom analizom i pripremom slika koje se koriste, kao i prilagodbom detekcije lokalnih maksimuma akumulacijskog polja.

Osim robusnosti, jedna od prednosti Houghove transformacije je i mogućnost paralelnog računanja. Svaki se element slike obrađuje neovisno o ostalima. Zahvaljujući tome elementi slike mogu se obrađivati paralelno što na paralelnoj arhitekturi omogućava računanje u stvarnom vremenu. [1]

Najveći nedostatak Houghove transformacije su veliki memorijski i računski zahtjevi. Zahtjevi transformacije rastu velikom brzinom s rastom broja parametara koji definiraju traženi oblik. Pravci imaju dva parametra, kružnice tri, a elipse čak 6, što znači

da je akumulacijsko polje za detekciju elipsi 6-dimenzionalno. Računski zahtjevi mogu se umanjiti korištenjem informacija sa slike radi ograničavanja raspona mogućih parametara. Ballard [2] je primjerice opisao kako optimizirati detekciju kružnica korištenjem gradijenta. Memorijski zahtjevi se mogu reducirati podjelom visoko dimenzionalnih problema u odvojene niže dimenzionalne. Metode reduciranja parametara također smanjuju memorijsku zahtjevnost.

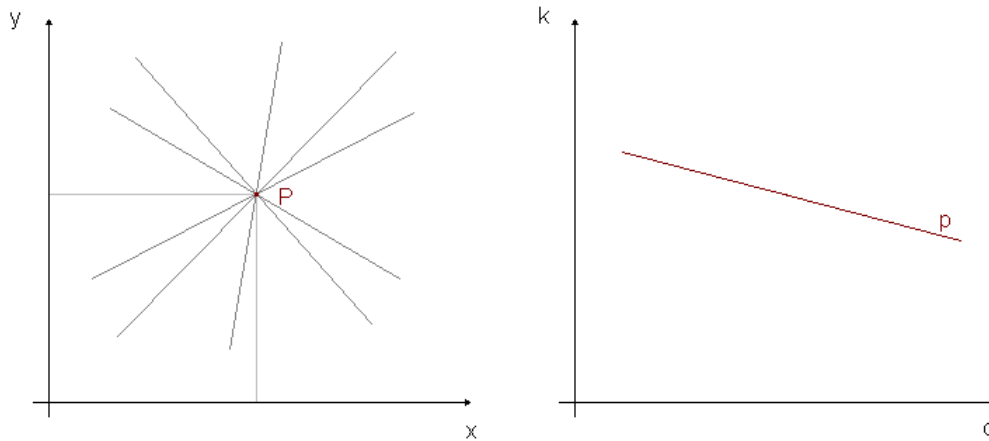
2. Klasična Houghova transformacija

2.1. Houghova transformacija za pravce

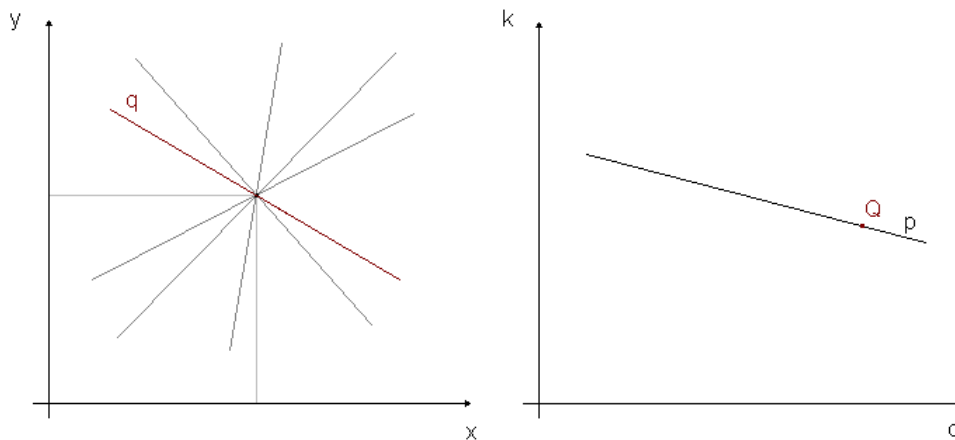
Za definiranje pravca dovoljna su nam dva parametra. Neka je pravac na slici definiran točkama koje zadovoljavaju sljedeću jednakost:

$$Y = kx + c \tag{1}$$

Neka točka P u prostoru x, y može pripadati svakom od skupa pravaca koji prolaze kroz nju. U prostoru k, c po jednakosti (1), ta točka P definira pravac p . Točka Q toga pravca u k, c prostoru definira točno jedan pravac q od skupa pravaca koji prolaze kroz točku P u prostoru x, y .



Slika 1: Skica odnosa točke u prostoru (x, y) i pravca u prostoru (k, c)



Slika 2: Skica odnosa pravca u prostoru (x, y) i točke u prostoru (k, c)

Koordinate točke u prostoru x, y predstavljaju vrijednosti parametara pravca u prostoru k, c (slika 1). Simetrično tome, koordinate točke u prostoru k, c određuju pravac u prostoru x, y (slika2), stoga se ova metoda može smatrati transformacijom između prostora x, y i k, c [7].

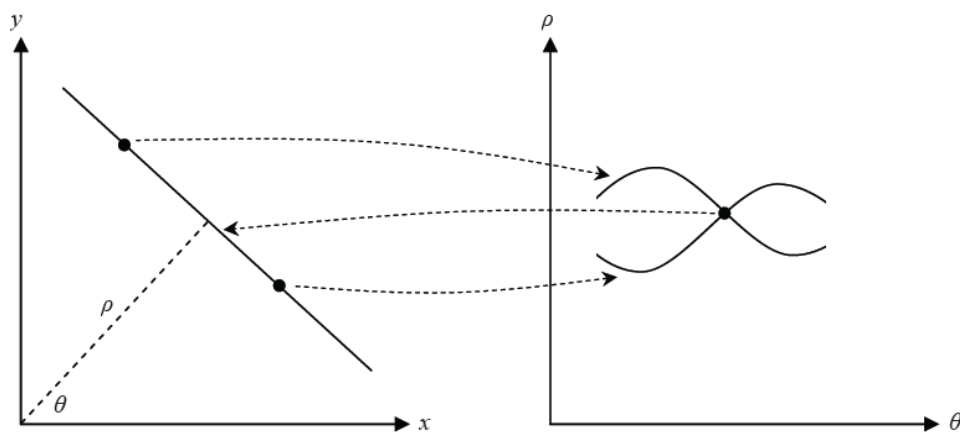
Svaki element slike (piksel) na traženom pravcu q u parametarskom prostoru iscrtava pripadajući pravac, to jest, glasuje za njega. Time se na sjecištu Q tih pravaca ostvaruje lokalni maksimum.

Dakle, parametri koji definiraju traženi pravac na slici su koordinate lokalnog maksimuma u parametarskom prostoru.

Budući da opisana jednakost ima beskonačni nagib za vertikalni pravac, koristi se alternativna, računski nešto zahtjevnija, metoda računanja parametara koju su opisali Duda i Hart. [4] Ta metoda zasniva se na jednadžbi pravca s parametrima ρ i θ .

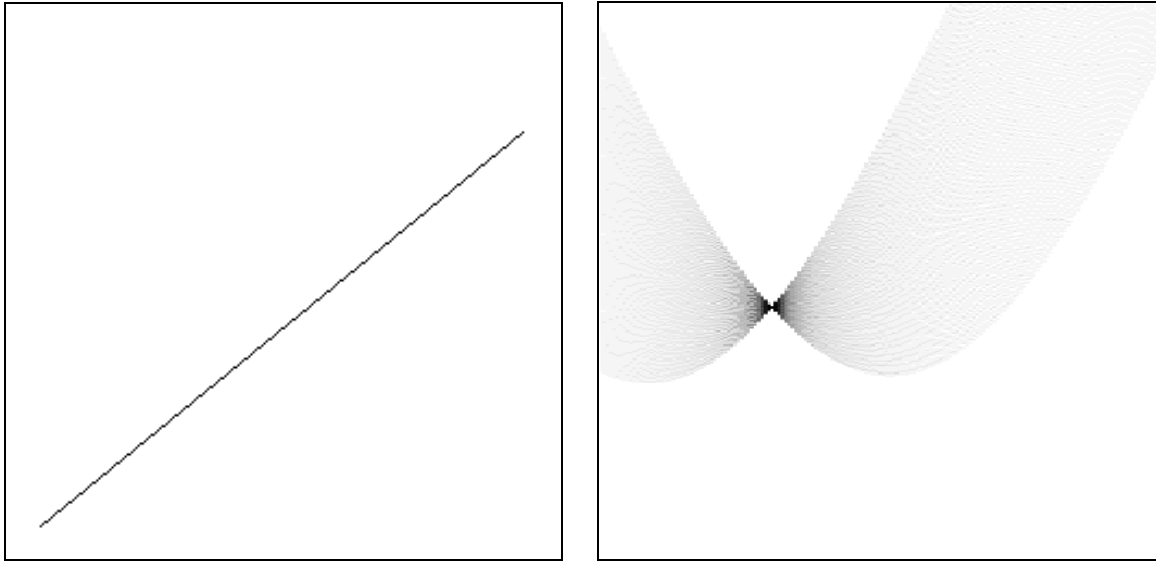
$$\rho \equiv \rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

U jednakosti (2) ρ je udaljenost pravca od ishodišta, a θ nagib normale pravca s obzirom na os x . Opisana jednakost pridružuje vrijednosti prostora x, y vrijednostima parametarskog prostora ρ, θ .



slika 3: prikaz parametara pravca ρ i θ i povezanosti pravca na slici s parametarskim prostorom [7]

Za razliku od jednakosti (1), elementi slike u parametarskom prostoru ρ, θ definiraju sinusoidne krivulje, a ne pravce. Pravac u x, y prostoru pridružen je sjecištu sinusoidnih krivulja u parametarskom prostoru.



slika 4: primjer vrijednosti u akumulacijskom polju (desno) dobivenih glasanjem izdvojenih elemenata koji pripadaju pravcu na slici (lijevo) (binarna slika je invertirana radi lakšeg prikaza)

Pseudokod Houghove transformacije za pravce:

```

max = round(sqrt(brojRedaka^2+brojStupaca^2));
accPolje=(max,180);

za x = 1 do brojStupaca
  za y = 1 do broj redaka
    ako slika(x,y) == 0
      //ako je piksel na ovome mjestu bijele boje (izdvojen)
      za m = 1 do 180
        r = round(x*cos(m*pi)/180) + y*sin(m*pi)/180);
        ako (r < max & r > 0)
          accPolje (r, m) = accPolje(r, m) + 1;
          //taj element glasuje za svoju pripadajuću sinusoidu
          //tako da se u 2D polju za 1 povećaju vrijednosti na
          //svim elementima koji pripadaju toj sinusoidi
        kraj
      kraj
    kraj
  kraj
kraj

```

2.2. Houghova transformacija za kružnice

Postupak detekcije pravaca Houghovom transformacijom opisan u poglavlju 3.1 može se jednostavno proširiti i na ostale parametarski definirane krivulje. Elementi krivulje definirani su sa n parametara $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, mogu biti definirani jednakošću oblika:

$$f((\alpha_1, \dots, \alpha_n), (x, y)) = 0 \quad (3)$$

Slijedeći navedenu jednakost, element slike (x, y) u parametarskom prostoru definira hiperravnina u n -dimenzionalnom parametarskom prostoru $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. Presjecište dobivenih hiperravnina predstavlja parametre koje najvjerojatnije karakteriziraju instancu traženog oblika u prostoru slike.

Za pravac tada jednakost poprima sljedeći oblik:

$$f(\rho, \theta), (x, y) = \rho - x \cos \theta - y \sin \theta = 0$$

Točke kružnice (x, y) definiraju se koordinatama centra (x_c, y_c) i radijusom r te kružnice kako je pokazano u jednakosti (4).

$$f(x_c, y_c, r), (x, y) = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 - r^2 = 0 \quad (4)$$

Parametarski možemo jednadžbu kružnice prikazati kao:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \cos(\theta) \\ y &= y_0 + r \sin(\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

Stoga se koordinate u akumulacijskom polju mogu izračunati uz pomoć jednakosti:

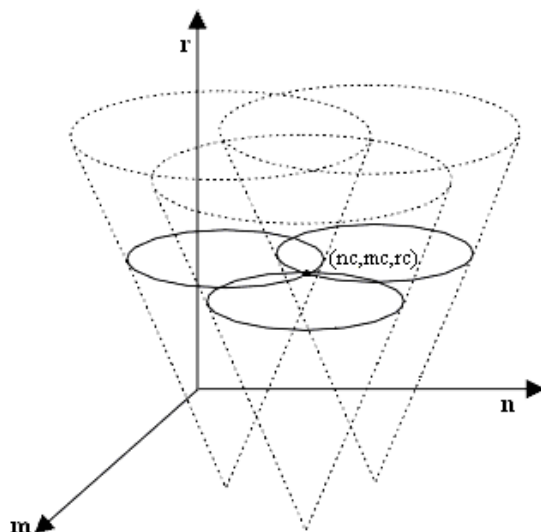
$$\begin{aligned} x_0 &= x - r \cos(\theta) \\ y_0 &= y - r \sin(\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

Gdje je θ element iz intervala $[0, 360]$, x_0 i y_0 su koordinate u akumulacijskom polju, x i y su koordinate elemenata na slici, a r je radijus kružnice.

Na temelju jednakosti (6), svaki se element (x, y) prostora slike pridružuje plaštu stošca koji u (x_c, y_c, r) parametarskom prostoru predstavlja sve kružnice koje prolaze

kroz točku (x,y) . Svakom mogućem radijusu odgovara točno jedna kružnica stožaste površine kako je prikazano na slici 5.

Houghova transformacija za kružnicu u osnovnom obliku zahtjeva 3-dimenzionalno akumulacijsko polje (m, n, r) , gdje je $m \times n$ veličina slike, a r broj mogućih radijusa.



slika 5: prikaz parametara kružnice u akumulacijskom polju

Pseudokod Houghove transformacije za kružnice:

```

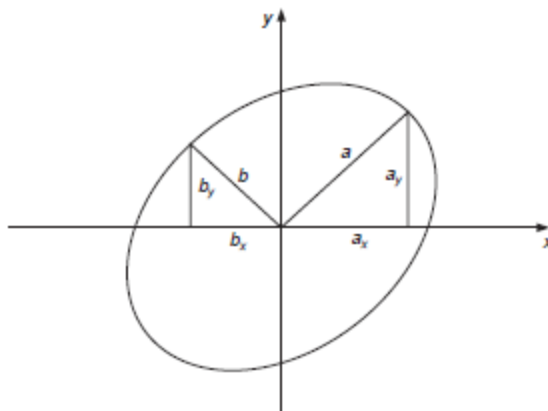
accPolje=(brojRedaka, brojStupaca);

za x = 1 do brojStupaca
  za y = 1 do brojRedaka
    ako slika(y,x) == 0
      //ako je piksel na ovome mjestu bijele boje (izdvojen)
      za kut= 0 do 360
        t = (kut*pi)/180;
        x0 = round(x - r*cos(t));
        y0 = round(y - r*sin(t));
        ako (x0<brojStupaca & x0>0 & y0<brojRedaka & y0>0)
          accPolje(y0, x0) = accPolje(y0, x0) + 1;
          //taj element glasuje za sve kružnice kojima bi mogao biti
          //središte tako da se u 3D polju za 1 povećaju vrijednosti na
          //svim elementima koji pripadaju takvim kružnicama
        kraj
      kraj
    kraj
  kraj
kraj

```

2.3. Houghova transformacija za elipse

Slično kao i kružnicu, elipsu možemo parametrizirati sljedećim vrijednostima: $(x_0, y_0, a_x, b_x, a_y, b_y)$ kako je pokazano na slici 6 [8]. Budući da je za definiranje elipse potrebno 6 parametara, Houghova transformacija za elipsu zahtjeva 6-dimenzionalni parametarski prostor.



slika 6: parametri elipse

Točke elipse (x, y) definiraju se koordinatama centra (x_c, y_c) te malom i velikom poluosi a i b kako je pokazano u jednakosti (7).

$$\frac{(x - x_c)^2}{a^2} + \frac{(y - y_c)^2}{b^2} = 1 \quad (7)$$

Parametarski možemo jednadžbu elipse prikazati kao:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + a_x \cos(\theta) - b_x \sin(\theta) \\ y &= y_0 + a_y \cos(\theta) - b_y \sin(\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

Stoga se koordinate u akumulacijskom polju mogu izračunati uz pomoć jednakosti:

$$\begin{aligned} x_0 &= x - a_x \cos(\theta) + b_x \sin(\theta) \\ y_0 &= y - a_y \cos(\theta) + b_y \sin(\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

Pseudokod Houghove transformacije za elipse:

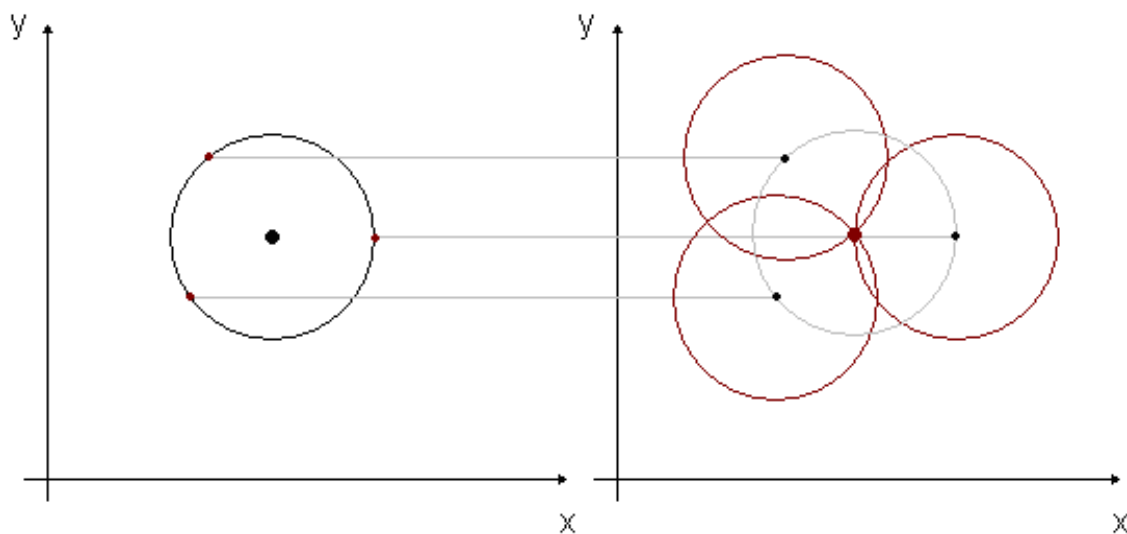
```
accPolje(brojRedaka, brojStupaca);

za x = 1 do brojStupaca
  za y = 1 do brojRedaka
    ako slika(y,x) == 0
      //ako je piksel na ovome mjestu bijele boje (izdvojen)
      za kut= 0 do 360
        t = (kut*pi)/180;
        x0 = round(x - a*cos(t));
        y0 = round(y - b*sin(t));
        ako (x0<brojStupaca & x0>0 & y0<brojRedaka & y0>0)
          accPolje(y0, x0) = accPolje(y0, x0) + 1;
          //taj element glasuje za sve pripadajuće elipse središte tako
          //da se u akumulacijskom polju za 1 povećaju vrijednosti na
          //svim elementima koji pripadaju takvim elipsama
      kraj
    kraj
  kraj
kraj
```

2.4. Pronalaženje prometnih znakova Houghovom transformacijom

Kao što je opisano u poglavlju 2.2 akumulacijsko polje za detekciju kružnica Houghovom transformacijom je trodimenzionalno. Parametri kružnice koji predstavljaju koordinate tog trodimenzionalnog parametarskog prostora su koordinate x i y iz prostora slike te radijus kružnice r . Ako fiksiramo vrijednost radijusa, akumulacijsko polje postaje dvodimenzionalno, ali mogu se pronaći samo kružnice čiji je radijus približno jednak zadanom. Kao što je prikazano na slici 7, točke kružnice u prostoru slike glasuju za kružnice čije sjecište u parametarskom prostoru stvara lokalni maksimum u središtu tražene kružnice.

Na opisani način, koristeći fiksni radijus, Houghovu transformaciju za kružnice koristili smo kao metodu za pronalaženje okruglih znakova izričitih naredbi s crvenim obrubom [9]. Prije same transformacije na slikama su izdvojeni elementi koji zadovoljavaju uvjet boje crvenih obruba okruglih znakova. Uspješnost implementacije ispitana je na slikama snimljenima iz automobila u pokretu.



slika 7: točke kružnice u prostoru slike (lijevo) glasuju za kružnice u parametarskom prostoru (desno)

Uspješnost ove implementacije u različitim uvjetima ovisi o velikom broju podesivih parametara. Jedan od njih je interval boje prilikom izdvajanja crvenih elemenata slike, to jest intervali nijanse, zasićenosti i intenziteta boje. Ako povećamo intervale parametara boje,

algoritam će naći i znakove koji zbog različitih utjecaja nisu jasne crvene boje, ali će se tada pojaviti i više smetnji. Osim boje na rezultate utječe i zadani radijus kružnica koje tražimo.

Sljedeći parametar o kojem ovise rezultati je osjetljivost na intenzitet slike prilikom izdvajanja središta kružnice u akumulacijskom polju. Ta osjetljivost zapravo označava koliki broj elemenata slike mora glasati za središte da bi ga mi izdvojili. U idealnim uvjetima za kružnicu debljine obruba jednog elementa slike (piksela) ta bi se vrijednost trebala kretati oko $2*r*\pi$. Ako debljinu obruba kružnice označimo s d , vrijednost maksimuma za potpuno izdvojenu kružnicu kretao bi se oko $d\pi(2r-d)$. Smanjenjem broja piksela koji moraju glasati za središte, algoritam postaje manje osjetljiv na promjenu radijusa, no tada također postaje osjetljiviji na smetnje. Također u slučaju smanjenja broja potrebnih glasova, algoritam će moći detektirati znakove koji su mutni, imaju smetnje ili im zbog kriterija boje ne mogu glasati svi pikseli.

Minimalna veličina područja maksimuma u akumulacijskom polju koju odlučimo smatrati znakom je kriterij kojim uglavnom smanjujemo vjerojatnost detektiranja smetnji kao znakova. Ona također ovisi o kvaliteti slike i veličini znaka, a njenim smanjenjem algoritam nalazi manje uočljive znakove, ali i ostale smetnje sličnih boja.



slika 8: akumulacijsko polje (desno) dobiveno glasanjem svakog crvenog piksela (lijevo) za svoju kružnicu zadanog radijusa (binarna slika je invertirana radi lakšeg prikaza)

Slike 9a, 9b, 9c, 9d, 9e i 9f prikazuju primjere detekcije znakova Houghovom transformacijom za kružnice sa fiksnim radijusom. Na slici 9f vidi se kako je osim uspješno detektiranog znaka detektiran i automobil crvene boje.



slika 9a



slika 9b



slika 9c



slika 9d



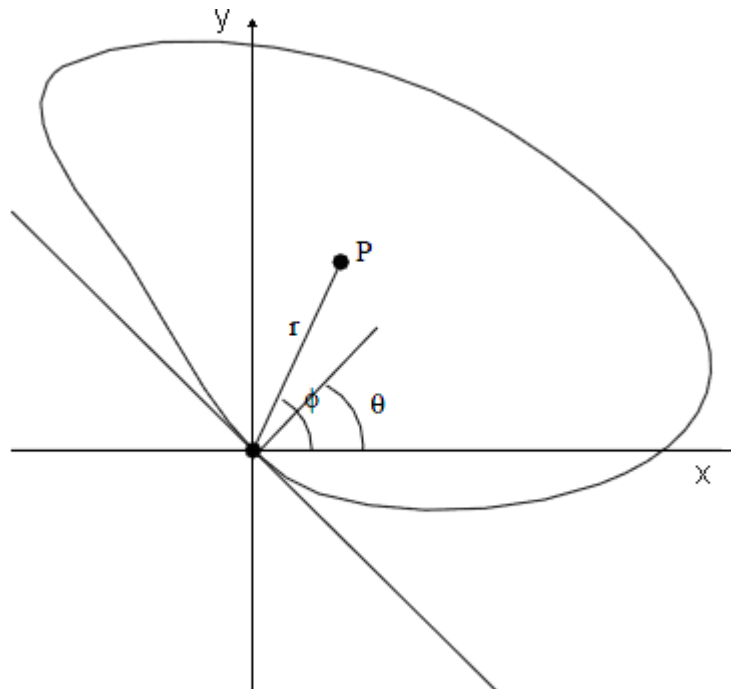
slika 9e



slika 9f

3. Generalizirana Houghova transformacija

Postoji nekoliko različitih pokušaja korištenja Houghove transformacije za pronalaženje oblika koje nije moguće parametarski prikazati. Jednu od prvih takvih generalizacija Houghove transformacije opisao je Ballard [2]. U zadanom, idealiziranom obliku odabire se referentna točka P . Svaka točka koja pripada rubu oblika može biti prikazana udaljenošću r i smjerom ϕ pravca koji spaja tu točku sa točkom P (slika 10). Te se dvije vrijednosti predstavljaju kao funkcije smjera normale na rub oblika θ i spremaju se u tablicu vrijednosti, to jest u R- tablicu. Na slici na kojoj tražimo zadani oblik svakom se elementu prethodno izdvojenom kao rubnom uz pomoć gradijenta određuje usmjerenje θ . Koristeći izračunato usmjerenje θ i indekse R tablice, svaki element „glasuje“ za moguću referentnu točku P . Na taj način maksimumi u akumulacijskom polju odrede traženi oblik.



slika 10: proizvoljni oblik i vrijednosti koje ga definiraju prilikom detekcije generaliziranom Houghovom transformacijom [1]

Pronalaženje oblika opisanom metodom moguće je samo ako su oblici iste orijentacije i veličine. U suprotnom dva parametra više nisu dovoljna za opis oblika.

4. Pomoćne metode

4.1. Izdvajanje rubnih elemenata

Prije same detekcije oblika obično se na slici uklanja šum i naglašavaju tražene informacije. Jedna od metoda kojima se to može ostvariti je izdvajanje rubnih elemenata, to jest elemenata slike koji pripadaju rubovima. Rubovi objekata na slici mogu se definirati kao mjesta naglih promjena u vrijednosti točaka slike.

U idealnom slučaju, rezultat detekcije rubova je binarna slika koja sadrži niz spojenih krivulja koje predstavljaju granice objekata. Binarna slika je slika koja se sastoji od samo dvije vrijednosti; minimalne i maksimalne odnosno crne i bijele. Elemente izdvojene kao važne (u ovom slučaju izdvojene granice objekata) označimo bijelom bojom dok sve ostale označimo crnom. Takva slika bijelom bojom prikazuje sva područja izdvojena kao rubne elemente. Prilikom detekcije oblika Houghovom transformacijom, elementi binarne slike koji imaju maksimalnu vrijednost su ti čiji se parametri preslikavaju u akumulacijsko polje. Ostali elementi slike (oni s minimalnom vrijednošću) se zanemaruju.



slika 11: rezultat detekcije rubova Sobelovim operatorom (binarna slika je invertirana radi lakšeg prikaza)

Neke od metoda za izdvajanje rubnih elemenata su gradijentni i kompas operatori. Gradijentni operatori konvolucijom sa slikom detektiraju oštrije rubove u dva

smjera (npr. Canny, Roberts, Prewitt, Sobel, Frei-Chen...), a kompas operatori u više smjerova.

Detekcija rubova Cannyjevim operatorom odvija se u četiri funkcionalne cjeline:

- glađenje slike
- određivanje gradijenta intenziteta slike
- stanjivanje rubova (non-maximum suppression)
- usporedba s pragom

Glađenjem slike uklanja se štetni šum, to jest postiže eliminacija lažnih rubova. Kako se šum uglavnom sastoji od visokih frekvencija, može se ukloniti linearnim niskopropusnim filtrom [12].

Prilikom određivanja gradijenta intenziteta slike za svaki se piksel određuje iznos (amplituda) vektora gradijenta i pripadajući smjer pružanja. Vodoravna komponenta iznosa gradijenta (G_x) svakog piksela dobiva se oduzimanjem vrijednosti piksela njegovog desnog i lijevog susjeda. Okomita komponenta iznosa gradijenta (G_y) dobiva se oduzimanjem vrijednosti piksela iznad i ispod promatranog piksela [11]. Iznos vektora gradijenta računa se prema formuli (10), a kut pružanja gradijenta prema formuli (11).

$$G = [(G_x * G_x) + (G_y * G_y)]^{1/2} \quad (10)$$

$$\Phi = \arctan(G_y, G_x) \quad (11)$$

Stanjivanje rubova (non-maximum suppression) je metoda kojom se rubove na slici stanjuje do veličine jednog piksela. To se postiže uz pomoć izračunatog gradijenta slike na sljedeći način:

- Ako je kut gradijenta promatranog piksela 0° piksel će se smatrati rubom ako mu je intenzitet veći od intenziteta u smjeru sjevera i juga (gore i dolje).
- Ako je kut gradijenta promatranog piksela 90° piksel će se smatrati rubom ako mu je intenzitet veći od intenziteta u smjeru zapada i istoka (lijevo i desno).
- Ako je kut gradijenta promatranog piksela 135° piksel će se smatrati rubom ako mu je intenzitet veći od intenziteta u smjeru sjeveroistoka i jugozapada.
- Ako je kut gradijenta promatranog piksela 45° piksel će se smatrati rubom ako mu je intenzitet veći od intenziteta u smjeru sjeverozapada i jugoistoka.

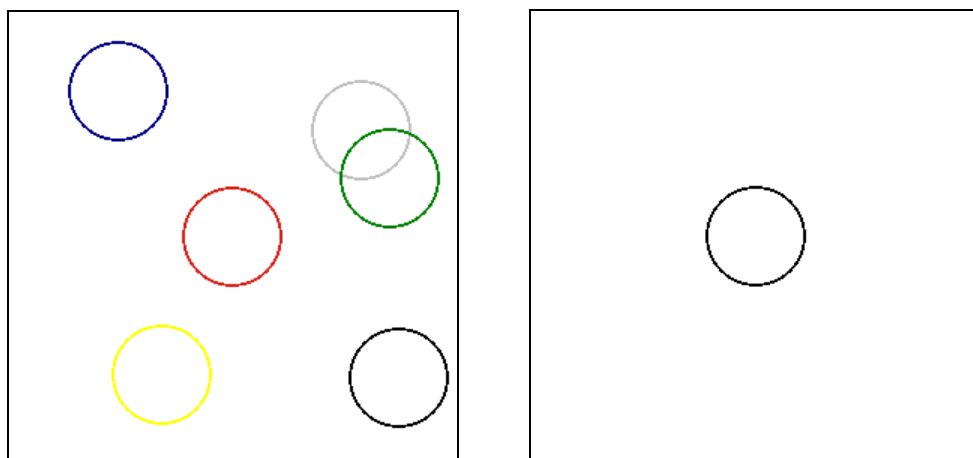
- U suprotnom se promatrani piksel poništava, to jest stavlja na nulu [11].

Četvrta i posljednja cjelina je usporedba s dvostrukim (histereznim) pragom. Točke s vrijednostima većim od većeg praga su valjane rubne točke. Točke s vrijednostima manjim od manjeg praga nisu valjane rubne točke. Za točke čija je vrijednost između dva praga dodatno se razmatra jesu li spojene s valjanim rubnim točkama. Ukoliko jesu tada su i one valjane rubne točke

4.2. Detekcija boje

U slučaju kada je boja dovoljna za izdvajanje rubova oblika koje detektiramo, važne elemente slike možemo izdvojiti detekcijom boje. Jedan od načina kojima to možemo ostvariti je detekcija u sustavu HSI. HSI model boja svaku boju predstavlja s tri komponente; nijansa (hue), zasićenje (saturation) i intenzitet (intensity). Boju u sustavu HSI možemo definirati intervalima nijanse (H) , zasićenja (S) i intenziteta (I) unutar kojih se nalazi vrijednost boje koju tražimo.

Rezultat detekcije boje je binarna slika, točnije slika koja se sastoji od samo dvije vrijednosti; minimalne i maksimalne odnosno crne i bijele. Binarnu sliku dobijemo tako da ispitamo svaki element slike i ukoliko se on nalazi unutar zadanih intervala H, S i I, označimo ga bijelom bojom dok ga u suprotnom označimo crnom. Takva slika bijelom bojom prikazuje sva područja koja zadovoljavaju naše kriterije boje.



slika 12: izdvajanje elemenata slike (lijevo) detekcijom crvene boje u binarnu sliku (desno)

4.3. Smanjenje prostora parametara

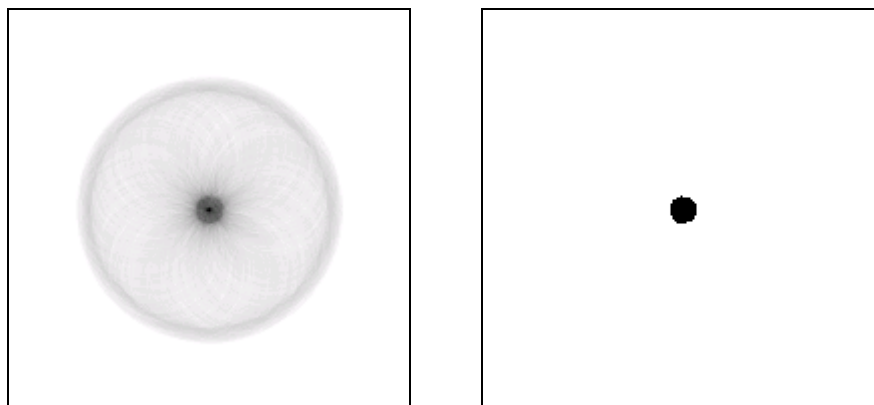
Prostor parametara za detekciju nekog oblika Houghovom transformacijom možemo smanjiti tako unaprijed pokušamo izračunati neke parametre oblika, ili da, ako problematika koju rješavamo to dozvoljava, fiksiramo neke parametre.

Kod detekcije pravca parametarski se prostor može reducirati na jednodimenzionalan korištenjem nagiba (θ) normale pravca s obzirom na os x . Nagib možemo izračunati korištenjem gradijentnog usmjerenja za jedan element ili par elemenata. Tako izračunati nagib ne ovisi o parametru ρ , to jest ρ i θ su sada neovisni.

Kod detekcije kružnica se također parametarski prostor može smanjiti uz pomoć druge usmjerene derivacije ili usmjerenja gradijenta. Cilj ovoga postupka je za svaki element kružnice pronaći pravac na kojem leži radijus. Taj se pravac u dvodimenzionalnom akumulacijskom polju pridružuje vrijednostima x_0 i y_0 . Jednom kad je na taj način detektirano središte kružnice, za pronalaženje radijusa dovoljno je jednodimenzionalno polje [8].

4.4. Izdvajanje maksimuma iz akumulacijskog polja

Rezultat Houghove transformacije je akumulacijsko polje u koje su preslikani parametri elemenata slike. Kao što je već opisano u prethodnim poglavljima, lokalni maksimumi akumulacijskog polja određuju gdje se nalaze pronađeni oblici. Vrijednost lokalnog maksimuma ovisi o veličini objekta i broju elemenata objekta koji su uspješno izdvojeni (primjerice izdvajanjem rubnih elemenata). Točnije, vrijednost maksimuma ovisi direktno o broju elemenata koji su glasali za njega. Upravo zbog toga lokalni maksimumi za više pronađenih objekata na slici ne moraju imati jednake vrijednosti. Lokalne maksimume možemo izdvojiti usporedbom s pragom (thresholding). Potrebno je pronaći graničnu vrijednost koja je manja od svih lokalnih maksimuma koji su dodijeljeni pronađenom obliku na slici, a s druge strane dovoljno velika da ne obuhvati preostale vrijednosti u akumulacijskom polju. Sve vrijednosti veće od nje postavimo na maksimalnu vrijednost, a sve manje na minimalnu i tako dobijemo binarnu sliku sa izdvojenim maksimumima.



slika 13: maksimumi akumulacijskog polja prilikom detekcije kružnice (lijevo) izdvojeni uz pomoć granične vrijednosti u binarnu sliku (desno) (binarna slika je invertirana radi lakšeg prikaza)

Naravno, nekada nije moguće pronaći vrijednost koja točno odijelila maksimume detektiranih objekata od onih koji su nastali neispravnom detekcijom.

4.5. Narastanje područja u binarnoj slici

Lokalni maksimumi u akumulacijskom polju dobivenom detekcijom oblika Houghovom transformacijom najčešće se protežu preko nekoliko elemenata polja. Za određivanje elementa koji približno točno određuje pronađeni oblik, potrebno je kao cjeline izdvojiti regije maksimuma na binarnoj slici dobivenoj izdvajanjem maksimuma iz akumulacijskog polja (poglavlje 4.5.). Jedan od algoritama kojima to možemo ostvariti je narastanje područja, odnosno flood fill.

Narastanje područja (flood fill) je algoritam koji određuje područje obojeno istom bojom na slici kao jednu cjelinu. Svaki se pronađeni bijeli element na binarnoj slici označava nekom vrijednošću te se ulazi u rekurzivnu funkciju, gdje se za svaki njegov susjedni element provjerava je li bijele boje i rekurzivno, jesu li bijele boje njegovi susjedi. Svi susjedi se označavaju istom vrijednošću, iz čega slijedi je skupina elemenata jedinstveno označena. Kada funkcija pronađe novi bijeli element, ponavlja se isti postupak, ovoga puta sa novom vrijednošću.

Pseudokodom možemo postupak opisati na sljedeći način [10]:

narastanje (element, ciljna boja, zamjenska boja)

1. ako boja elementa nije jednaka ciljnoj boji, izađi iz petlje
2. ako je boja elementa jednaka zamjenskoj boji, izađi iz petlje
3. oboji element zamjenskom bojom.

4. *narastanje* (korak lijevo od elementa, ciljna boja, zamjenska boja)

narastanje (korak desno od elementa, ciljna boja, zamjenska boja)

narastanje (korak iznad elementa, ciljna boja, zamjenska boja)

narastanje (korak ispod elementa, ciljna boja, zamjenska boja)

5. izađi iz petlje

Opisani algoritam provjerava povezanost u 4 smjera, no na sličan se način može ostvariti algoritam narastanja područja u osam smjerova koji provjerava i elemente slike koji se dodiruju vrhovima a ne samo stranicama.

Zaključak

Velika prednost Houghove transformacije je njena robusnost, to jest činjenica da omogućava detekciju oblika i kad su oni djelomično prekriveni, zamučeni ili samo djelom izdvojeni u pripremnoj obradi slike. Osim toga, svaki se element slike obrađuje neovisno o ostalima što omogućava paralelno računanje.

Houghovom transformacijom može se pronaći bilo koji parametarski definirani oblik, no rastom broja parametara potrebnih za opis oblika rastu i memorijski i računski zahtjevi. Stoga je korištenje Houghove transformacije za detekciju oblika isplativo samo za detekciju oblika s manjim brojem parametara. Jedno od mogućih rješenja tog problema je smanjenje prostora parametara estimacijom nekih od potrebnih parametara. Memorijski zahtjevi se mogu reducirati i podjelom visoko dimenzionalnih problema u odvojene niže dimenzionalne.

Osim parametarskih oblika, Houghovom transformacijom mogu se detektirati i proizvoljni oblici. Što se tiče računске i memorijske zahtjevnosti, opisana metoda detekcije proizvoljnih oblika isplativa je samo u slučaju kad je traženi oblik uvijek iste orijentacije i veličine.

Houghova transformacija je jednostavna i korisna metoda za detekciju jednostavnih oblika. Uz pažljivu prethodnu obradu slika i proučavanje samog problema, ovom transformacijom mogu se dobiti jako dobri rezultati.

Literatura:

- [1] Lladós, J., *The Hough Transform As A Tool For Image Analysis*, Master degree, Universitat Autònoma de Barcelona, 2003.
- [2] Ballard, D.H., *Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes*, *Pattern Recognition*, 13(2):111–122, 1981.
- [3] Hough, P.V.C., *Method and means for recognising complex patterns*, Technical report, 1962. U.S. Patent No. 3069654.
- [4] Duda, R.O, Hart, P.E., *Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures*. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 15:11–15, 1972.
- [5] Charles V. Stewart, *Robust Estimation Techniques Developed in Computer Vision*, 7.2.2008, *Robust Parameter Estimation in Computer Vision*,
- [6] J. Illingworth and J. Kittler. *A survey of the Hough transform*. *CVGIP: Image Understanding*, 44:87–116, 1988.
- [7] Antolović, D., *Review of the Hough Transform Method, With an Implementation of the Fast Hough Variant for Line Detection*, 14.4.2008, <http://www.cs.indiana.edu/cgi-bin/techreports/TRNNN.cgi?trnum=TR663>, 18.4.2009.
- [8] Nixon, M.S., Aguado, A.S., *Feature Extraction and Image Processing: Hough transform (HT)*, prvo izdanje 2002, Oxford, Newnes, 2002.
- [9] Šverko, M., *Pronalaženje prometnih znakova Houghovom transformacijom*, završni rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2008.
- [10] Flood fill, 13.12.2001., Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Flood_fill, 10. 5. 2009,
- [11] Canny edge detector, 10. 01. 2009. Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector, 10. 5. 2009
- [12] Bašić Š., Čepo P., Dodolović I., Dostal D., Grbić S., Gulić M., Horvatin I., Louč S., Sučić I., *Cannyev detektor rubova, Tehnička dokumentacija*, projekt na preddiplomskom studiju, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2009.

Sažetak

U ovom je radu predstavljena Houghova transformacija i neke njene primjene. Houghova transformacija je robusna tehnika procjenjivanja parametara temeljena na načelu glasanja. U računalnom vidu, Houghovom transformacijom pronalaze se parametri nesavršenih primjeraka zadane klase oblika. Primjerci klase oblika definiraju se n -torkom parametara. Osim parametarskih oblika, Houghovom transformacijom mogu se detektirati i proizvoljni oblici.

U radu je opisan je primjer primjene Houghove transformacije za pronalaženje okruglih znakova izričitih naredbi s crvenim obrubom. U svrhu pripreme slike za obradu Houghovom transformacijom, jednostavniju primjenu te kvalitetnije dobivene rezultate, opisano je nekoliko pomoćnih metoda.