



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



MAŠINSKA VIZIJA U MEHATRONICI

Ivan Čirić
Miloš Simonović
Milan Pavlović
Stevica Cvetković

MAŠINSKA VIZIJA U MEHATRONICI



Ivan Čirić
Miloš Simonović
Milan Pavlović
Stevica Cvetković

Niš, 2025.

MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU

MAŠINSKA VIZIJA U MEHATRONICI

Ivan Ćirić, Miloš Simonović, Milan Pavlović, Stevica Cvetković

NIŠ, 2025.

dr Ivan Ćirić, vanredni profesor

dr Miloš Simonović, vanredni profesor

dr Milan Pavlović, viši predavač

dr Stevica Cvetković, vanredni profesor

MAŠINSKA VIZIJA U MEHATRONICI

Prvo izdanje, 2025.

Recenzenti:

dr Danijela Ristić Durrant, redovni profesor

dr Aleksandar Milosavljević, redovni profesor

Izdaje:

Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu

Za izdavača:

dr Goran Janevski, redovni profesor

Dizajn korica:

Saša Đorđević

Štampa:

Galeb D.O.O.

Tiraž:

100 primeraka

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu odobren je za štampu rukopis " MAŠINSKA VIZIJA U MEHATRONICI " kao univerzitetski udžbenik.

Predgovor

Razvoj mehatronike kao savremene interdisciplinarne oblasti, koja objedinjuje mašinstvo, elektrotehniku, računarstvo i teoriju upravljanja, suštinski je promenio način projektovanja, realizacije i funkcionisanja tehničkih sistema. U okviru takvog razvoja, mašinska vizija se izdvojila kao jedan od najznačajnijih i najdinamičnijih segmenata, jer predstavlja ključnu sponu između fizičkog sveta i digitalnih sistema koji ga opažaju, tumače i koriste za donošenje odluka.

Mašinska i kompjuterska vizija danas predstavljaju nezaobilaznu komponentu savremenih tehničkih nauka i sastavni su deo nastavnih i istraživačkih aktivnosti na visokoškolskim ustanovama širom sveta. Razvoj industrijske robotike, pametne proizvodnje, autonomnih sistema i inteligentnih mehatroničkih rešenja u velikoj meri oslanja se na sposobnost sistema da vizuelno percipiraju svoje okruženje, izdvajaju relevantne informacije i reaguju u realnom vremenu. U tom kontekstu, mašinska vizija zauzima centralno mesto u savremenoj mehatronici, povezujući klasične algoritme obrade slike sa naprednim metodama mašinskog učenja i veštačke inteligencije.

Udžbenik „Mašinska vizija u mehatronici“ nastao je kao rezultat dugogodišnjeg nastavnog i istraživačkog rada autora u oblastima inteligentnih sistema upravljanja, robotike i primene veštačke inteligencije u tehničkim naukama. Osnovni motiv za njegovo nastajanje bio je da se studentima, istraživačima i inženjerima ponudi sveobuhvatan i sistematičan prikaz naučnih osnova i praktičnih primena mašinske vizije, koji ne podrazumeva samo opis pojedinačnih tehnika, već i njihovo kritičko sagledavanje i povezivanje sa realnim mehatroničkim sistemima. Poseban akcenat stavljen je na integraciju vizuelnih senzora, modelovanje kamera, prostornu percepciju i 3D rekonstrukciju, kao i na savremene pristupe zasnovane na konvolucionim neuronskim mrežama i algoritmima dubokog učenja u realnom vremenu.

Sadržaj udžbenika koncipiran je progresivno, tako da čitaoca vodi od osnovnih pojmova ka naprednim konceptima. Nakon uvodnih razmatranja istorijskog razvoja mašinske vizije i njenog mesta u savremenim

industrijskim i istraživačkim sistemima, detaljno su obrađene osnove digitalne slike i vizuelne percepcije, uključujući strukturu i formate slika, prostore boja, rezoluciju i dubinu boje. Ovi sadržaji postavljaju neophodnu teorijsku osnovu za razumevanje složenijih metoda obrade i analize slike. U nastavku su razmatrane operacije nad digitalnim slikama u prostornom i frekventnom domenu, morfološke transformacije, kao i metode segmentacije i izdvajanja karakteristika, koje omogućavaju efikasnu ekstrakciju informacija iz vizuelnih podataka.

Značajan deo udžbenika posvećen je vizuelnoj geometriji i prostornoj percepciji, uključujući modele kamera, homografiju, stereo viziju i trodimenzionalnu rekonstrukciju scene. Ove teme imaju ključnu ulogu u primenama mašinske vizije u robotici, navigaciji i autonomnim sistemima, gde je pouzdano razumevanje prostorne strukture okruženja od presudnog značaja. Posebna pažnja posvećena je i senzorima percepcije okoline, uključujući različite tipove kamera, kao i LiDAR i radar sisteme, uz razmatranje njihove integracije i fuzije u okviru složenih mehatroničkih sistema.

Centralno mesto u udžbeniku zauzima primena mašinskog učenja i veštačke inteligencije u mašinskoj viziji. U ovom delu obrađeni su osnovni principi mašinskog učenja, arhitekture konvolucionih neuronskih mreža, kao i savremeni pristupi detekciji objekata, segmentaciji scena i generativnom modelovanju. Poseban akcenat stavljen je na praktične aspekte implementacije algoritama i njihovu primenu u realnim sistemima, uključujući i embedded platforme. Takođe, jedno poglavlje posvećeno je proceni poze i kretanja čoveka, sa prikazom kako klasičnih, tako i savremenih deep learning pristupa, uz razmatranje primena u interakciji čovek–robot, bezbednosti na radu, sportu i medicini.

Završni deo knjige usmeren je ka konkretnim primenama mašinske vizije u složenim mehatroničkim sistemima, kroz primere vizuelnog upravljanja robotima, kontrole kvaliteta u proizvodnji, automatizacije procesa montaže i inspekcije, kao i primene u autonomnim vozilima i robotskoj navigaciji. Posebna pažnja posvećena je integraciji vizuelnih

sistema sa drugim senzorima i upravljačkim strukturama, kao i implementaciji algoritama u realnom vremenu.

Posebnu vrednost udžbenika predstavljaju brojni praktični primeri i eksperimentalni rezultati dobijeni u okviru međunarodnih i nacionalnih istraživačkih i inovacionih projekata, kao što su SMART H2020, SMART2 H2020, IIMEO Horizon Europe, SPATRA Horizon Europe, AgAR, RoboShepherd, ATUVIS, Koško i drugi, u kojima su autori aktivno učestvovali. Time je omogućeno da sadržaj knjige ne ostane na nivou teorijske analize, već da se prikažu realne aplikacije i konkretni primeri integracije mašinske vizije u složene mehatroničke sisteme. Pored toga, u knjigu su uključeni i primeri nastali kao rezultat istraživačkog rada studenata tokom izrade završnih i master radova, čime se dodatno naglašava značaj ranog uključivanja studenata u naučnoistraživački rad.

Udžbenik je namenjen studentima osnovnih i master studija iz oblasti mehatronike, mašinstva, elektrotehnike i računarstva, ali i istraživačima i inženjerima koji se bave razvojem inteligentnih mašina, sistema automatske inspekcije, mobilnih robota i savremenih proizvodnih sistema. Ceo sadržaj dosledno je praćen primerima realizovanim u programskim okruženjima MATLAB i Python, uz korišćenje savremenih biblioteka kao što su OpenCV, PyTorch i TensorFlow, što omogućava neposredno povezivanje teorijskih znanja sa praktičnom implementacijom.

Autori se srdačno zahvaljuju recenzentima na stručnim sugestijama i konstruktivnim primedbama koje su doprinele konačnom obliku udžbenika. Posebna zahvalnost pripada i studentima, danas diplomiranim inženjerima, čija su pitanja, komentari i zapažanja tokom nastavnog i projektnog rada pomogla autorima da prepoznaju i jasnije oblikuju konceptualno zahtevne delove gradiva.

Niš, novembra 2025. godine

Autori

Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Pregled aplikacija u industriji i istraživanjima.....	4
1.2. Istorija i razvoj savremene kompjuterske vizije.....	7
1.3. Mašinska vizija u Industriji 4.0 i 5.0.....	15
1.3.1. Industrija 4.0	15
1.3.2. Industrija 5.0	17
2. OSNOVE DIGITALNE SLIKE	20
2.1. Vizuelna percepcija.....	20
2.2. Akvizicija digitalne slike.....	26
2.3. Struktura i rezolucija digitalnih slika	32
2.4. Klasifikacija digitalnih slika	35
2.4.1. Binarne i sive slike	35
2.4.2. Slike u boji	37
2.4.3. RGB model boja.....	40
2.4.4. YCbCr model boja	46
2.4.5. HSV model boja	53
3. DIGITALNA OBRADA I ANALIZA SLIKE	57
3.1. Pобољшanje kvaliteta slike.....	60
3.1.1. Linearno širenje kontrasta	61
3.1.2. Stepna transformacija intenziteta piksela	66
3.1.3. Ujednačavanje histograma	69
3.1.4. Globalno i lokalno ujednačavanje histograma	73
3.2. Filtriranje slike u prostornom domenu i frekvencijskom domenu	74
3.2.1. Filtriranje slike u prostornom domenu	75
3.2.2. Linearno prostorno filtriranje	77
3.2.3. Prostorno usrednjavanje – „glačanje“ slike.....	81
3.2.4. Nelinearno filtriranje.....	83

3.2.5. Filtriranje slike u frekvencijskom domenu	84
3.2.6. Furijeova transformacija	86
3.2.7. Vizuelizacija 2D DFT	88
3.2.8. Osobine 2D DFT	89
3.3. Filtriranje u frekvencijskom domenu	92
3.3.1. Transformacija prostornih filtara u frekvencijski domen.....	92
3.3.2. Direktno definisanje filtra u frekvencijskom domenu	93
3.3.3. Poređenje filtriranja u prostornom i frekvencijskom domenu.....	94
3.4. Segmentacija slike.....	97
3.4.1. Segmentacija zasnovana na pragu.....	100
3.4.2. Segmentacija rastom regiona	104
3.4.3. Segmentacija spajanjem i razdvajanjem regiona	107
3.5. Morfološke operacije nad binarnom slikom	110
3.5.1. Dilatacija i erozija binarne slike.....	111
3.5.2. Morfološko otvaranje i zatvaranje.....	114
3.6. Detekcija ivica na slici	115
3.7. Segmentacija na bazi boje.....	125
3.7.1. Segmentacija zasnovana na pragu.....	128
3.7.2. Grupisanje boja u RGB prostoru korišćenjem K-means algoritma	131
3.8. Izdvajanje karakteristika (SIFT, SURF, ORB)	133
3.8.1. SIFT.....	134
3.8.2. SURF.....	140
3.8.3. ORB.....	147
4. VIZUELNA GEOMETRIJA I PROSTORNA PERCEPCIJA	152
4.1. Modeli kamere	152
4.1.1. Osnovni pinhole model kamere	153
4.1.2. Opšti pinhole model i intrinzični parametri	154

4.1.3. Ekstrinzični parametri i položaj kamere u prostoru	154
4.1.4. Konačni projekivni model kamere	155
4.2. Planarna geometrija i homografija	156
4.3. Osnovi stereo vizije.....	161
4.3.1. Kalibracija kamera i epipolarna geometrija	163
4.3.2. Dubinska mapa i 3D rekonstrukcija scene	167
4.3.3. Segmentacija mape dispariteta	173
5. SENZORI PERCEPCIJE OKOLINE	180
5.1. RGB kamere.....	181
5.2. Infracrvene kamere – termovizijski sistemi	184
5.3. Sistemi noćne vizije	190
5.4. Stereovizijski sistemi	198
5.5. Time-of-Flight (ToF) kamere.....	200
5.6. Radar i LiDAR	205
5.7. Fuzija senzora.....	215
5.7.1. Fuzija termovizijske kamere i noćne vizije.....	215
5.7.2. Fuzija RGB kamere i ToF kamere	216
5.7.3. Fuzija stereo sistema i ToF kamere.....	217
5.7.4. Fuzija LiDAR-a, radara i kamera	218
6. MAŠINSKO UČENJE U MAŠINSKOJ VIZIJI	220
6.1. Duboko učenje i klasični pristupi u kompjuterskoj viziji	220
6.2. Mašinsko učenje – osnovni koncepti i tipovi učenja	225
6.2.1. Osnove i algoritmi nadgledanog učenja	228
6.2.2. Nenadgledano učenje u analizi podataka	229
6.2.3. Pojačano učenje u interaktivnim sistemima	231
6.3. Duboko učenje i duboke neuronske mreže	233
6.3.1. Veštačke neuronske mreže	233
6.3.2. Struktura i komponente veštačkih neuronskih mreža	234
6.3.3. Duboko učenje u detekciji objekata	237

6.4. Konvolutivne neuronske mreže.....	238
6.4.1. Konvolucija	240
6.5. Ultralytics YOLO model.....	243
6.6. Objašnjiva veštačka inteligencija.....	253
7. ESTIMACIJA POZE I POLOŽAJA ČOVEKA	256
7.1. Procena poze u 2D prostoru	257
7.2. pristupi proceni poze: top-down i bottom-up.....	257
7.2.1. Integrisani pristupi proceni poze	258
7.2.2. Reprezentacija poze i pouzdanost ključnih tačaka.....	258
7.3. YOLO-Pose.....	259
7.3.1. Procena uglova zglobova i analiza kretanja na osnovu skeletnih tačaka	261
8. PRIMENA MAŠINSKE VIZIJE U MEHATRONIČKIM SISTEMIMA	268
8.1. Funkcionalna podela primene mašinske vizije u mehatronici ...	270
8.1.1. Mašinska vizija za percepciju i detekciju objekata	270
8.1.2. Mašinska vizija za pozicioniranje i lokalizaciju	271
8.1.3. Mašinska vizija u upravljanju i zatvorenim regulacionim petljama	271
8.1.4. Mašinska vizija za inspekciju i kontrolu kvaliteta	272
8.1.5. Mašinska vizija u autonomnim sistemima i navigaciji	272
8.1.6. Mašinska vizija u interakciji čovek–mašina	273
8.1.7. Mašinska vizija u dijagnostici i održavanju tehničkih sistema.....	273
8.1.8. Mašinska vizija u inteligentnim i kognitivnim mehatroničkim sistemima	273
8.2. Vizuelna kontrola kvaliteta u proizvodnji , automatizacija procesa montaže i inspekcije	275
8.2.1. Mašinska vizija u automobilske industriji	277
8.2.2. Primer detekcije defekata na pneumaticima	277

8.2.3. Mašinska vizija u prehrambenoj industriji	291
8.2.4. Mašinska vizija u farmaceutskoj industriji	291
8.2.5. Mašinska vizija u vazduhoplovnoj industriji	292
8.2.6. Mašinska vizija u logistici i distribuciji	292
8.3. Simulacija primene FANUC robota za proveru kvaliteta proizvoda	293
8.4. Stereo vizija za robotsku navigaciju	302
8.4.1. Percepcija prepreka i slobodnog prostora	303
8.4.2. Praćenje dinamičkih objekata i ljudi	304
8.5. Detekcija objekata u realnom vremenu	305
8.5.1. Implementacija CNN modela na embedded sistemima	305
8.5.2. Izbor embedded platforme: NVIDIA Jetson Orin Nano	306
8.6. Naučno – istraživački i inovacioni projekti sa primenom mašinske vizije u mehatronici	312
8.6.1. ATUVIS – autonomni robot za vizuelnu inspekciju podvozja vozova	312
8.6.2. SPATRA (EUSPA): Mašinska vizija i GNSS-potpomognuta fuzija senzora u mehatroničkim sistemima	327
8.6.3. IIMEO (Horizon Europe – Space): Instantaneous Infrastructure Monitoring by Earth Observation – mašinska vizija, SAR i fuzija senzora za nadzor kritične infrastrukture	335
8.6.4. SMART2 (Shift2Rail): Holistički sistem detekcije prepreka i upada na kolosek zasnovan na mašinskoj viziji i fuziji senzora	343
9. SOFTVERSKI ALATI I BIBLIOTEKE ZA RAD SA SLIKOM ..	355
9.1. Matlab	355
9.1.1. Učitavanje i prikaz slike	356
9.1.2. VektORIZOVANJE operacija	357
9.1.3. Histogram slike	358
9.1.4. Linearno filtriranje slike - konvolucija	359

9.1.5. Izdvajanje ivica slike.....	360
9.1.6. Linearno filtriranje u frekvencijskom domenu	361
9.1.7. Segmentacija slike.....	362
9.1.8. Obrada like u boji.....	363
9.2. Python i OpenCV biblioteka	365
9.2.1. Učitavanje i prikaz slike.....	367
9.2.2. Pristup pojedinačnim pikselima	369
9.2.3. Izdvajanje delova slike – operator dvotačka	371
9.2.4. VektORIZOVANE operacije nad pikselima	372
9.2.5. Promena dimenzija slike uz očuvanje proporcija.....	374
9.2.6. Iscrtavanje po slici.....	375
9.2.7. Konvolucija	376
9.3. PyTorch biblioteka	378
9.3.1. Tenzori	379
9.3.2. Automatsko izračunavanje diferencijala (izvoda) funkcije.....	380
9.3.3. Procesiranje na GPU	380
9.3.4. Dataset i DataLoader objekti.....	381
9.3.5. Postupak treniranja modela u PyTorch	382
9.3.6. Implementacija AlexNet mreže u PyTorch.....	383
9.4. ROS (Robot Operating System) i integracija vizije	386
9.5. Alati za anotaciju i dataset management	388
Literatura.....	393

ISBN 978-86-6055-198-8

