Training 4.0: Konenäkö

Search the course Search Resume Course

Collapse All

- Johdanto konenäköön ja kurssin esittely
  - Johdanto konenäköön
  - Kurssin esittely
  - Videoesimerkkejä
- Kamerat
  - Järjestelmäarkkitehtuurit
  - Matriisi- ja viivakamerat
  - Harmaasävy- ja värikamerat sekä kuvanmuodostus
  - Kenno ja kennotyypit
  - Suljin ja suljintyypit
  - Kameran mitoitus ja valinta
- Objektiivit
  - Yleistä
  - Kuva-ala
  - Sopivuus kameran kanssa
  - Polttoväli
  - Aukkosuhde (f-luku)
  - Linssin virheet
  - Telesentriset objektiivit
  - Objektiivin mitoitus ja valinta
- Valaistus
  - Valaistuksen merkitys
  - Yleistä valosta
  - Valaisintyypit
  - Valaisugeometriat
  - Valaistuksen valinta
- Konenäkömenetelmät
  - Konenäkömenetelmän rakenne

Video: tarkistusrutiinin rakentaminen älykameralle

RUNS ON
tutor
POWERED BY
OPEN edX

Johdanto konenäköön

Bookmark this page

Konenäöllä tarkoitetaan automatisoitua digitaalisista kuvista tehtävää halutun tiedon analysointia ja tämän tiedon pohjalta tehtävää päätöksentekoa. Käytännön tasolla konenäköjärjestelmiä käytetään teollisuudessa erilaisissa tarkasti ennalta määritetyissä tehtävissä. Näitä voivat olla esimerkiksi kuljettimella kulkevien kappaleiden laskenta, sarjanumeroiden luku tai muoto ja pintavirheiden etsintä. Konenäöllä korvataan ihmissilmän tarve teollisuuden sovelluksissa.

Konenäön komponentit

Konenäköjärjestelmän komponentteja ovat

- kamera ja sen optiikka
- valaistus
- tietokone (voi olla integroituna kameraan)
- konenäköohjelmisto (voi olla integroituna kameraan)
- liitynnät muihin järjestelmiin, esimerkiksi ohjelmoitaviin logiikoihin

Konenäön hyödyt

Ihmissilmään perustuvaan kappaleiden seurantaan liittyy monia heikkouksia:

- Silmän ja ihmisen väsymisestä aiheutuva suorituskyvyn heikkeneminen
- Analyysin subjektiivisuus ja vaihteleva laatu (mielipide, vireystila, jne)
- Toimintanopeus on melko rajoittunut
- Kustannukset ovat korkeat
- Työ on monotonista
- Vaarallisista olosuhteista aiheutuvat ongelmat

Konenäkö myös korvaa ihmissilmän sellaisissa paikoissa, joissa silmä ei toimi nopeuden, tarkkuuden, pimeyden ja olosuhteiden tms. syiden vuoksi. Konenäkö ei väsy. Siksi konenäköjärjestelmiä käytetään erityisesti tehtäviin, joissa kappaleiden visuaalisen tarkastuksen pitää olla nopeaa, tarkkaa, ympärivuorokautista ja toistettavaa. Ihmiselle nämä tehtävät ovat rasittavaa rutiinia tai näkökyvyn tarkkuudelle mahdottomia. Lisäksi konenäkösovellusten etuna on se, että siinä voidaan hyödyntää myös sellaisia valon aallonpituuksia, jotka ovat näkymättömiä ihmissilmälle.

Teollisuuden tuottavuuden mittareilla mitattuna konenäön selkeitä etuja ovat:

- Laadunvalvonta helpottuu, laatu paranee
- Parempi tuottavuus, koska yksinkertaiset, toistuvat ja manuaaliset tehtävät voidaan korvata konenäköjärjestelmällä
- Tuotannon joustavuus, robotin ohjaus konenäön avulla
- Alhaisemmat tuotantokustannukset, koska mahdolliset virheet voidaan tunnistaa konenäön avulla jo varhaisessa vaiheessa
- Varastonhallinta, tuotteiden tunnistus, lajittelu
- Tilasäästöt, koska linjastolle ei tarvita enää operattoria. Kuljettimet voidaan sijoittaa lähelle toisiaan.

Yksinkertaisuudessaan kasvaneet laatuvaatimukset ja valmistettavien tuotteiden laskenut hintataso ovat aikaansaaneet sen, että tuotannon tulee olla tehokasta. Tuotantoprosessi tulee optimoida niin, että jokainen valmistettava tuote pystytään tarkastamaan virheiden varalta tuotantonopeuden kuitenkaan kärsimättä. Tuotantonopeuden ollessa kova, ainut tapa tuotteiden systemaattiseen tarkastukseen on konenäköjärjestelmien käyttäminen.

Käyttökohteet

Teollisuudessa tyypillisimmät konenäön käyttökohteet ovat

- Tarkastukset (muoto, läsnäolo, väri, valmistusvirhe, jne.)
- Mittaukset (dimensiomittaus, paikoitus)
- Ohjaus / paikoitus (robotin ohjaus, liikkuva tai paikallaan oleva kohde)
- Koodinluku (matriisikoodit ja OCR = Optical Character Recognition)

Teollisuuden lisäksi sovellusalueita ovat esimerkiksi

- Lääketiede (mikro- ja makrotason kuvaaminen)
- Turvallisuus, valvonta ja liikenne (biometria, lainvalvonta, riistakamerat, automaattinen rekisterikilven tunnistus jne.)
- Kodin- ja viihde-elektroniikan ratkaisut (tarjoilijarobotit, pelikonsolit, mobiilit ratkaisut jne.)

Kameratekniikan halpenemisen myötä konenäkösovellukset yleistyvät jatkuvasti kaikilla osa-alueilla. 2010-luvulla etenkin 3d-kuvantaminen on yleistynyt voimakkaasti. Tulevaisuudessa laitteet halpenevat entisestään, niiden suorituskyky kasvaa, ohjelmistojen käytettävyys helpottu, sekä mukaan tulee enemmän tekoälypohjaisia sovelluksia.

Lähteet:

Vision-Doctor. Why industrial machine vision? https:// www.vision-doctor.com/en/introduction.html

Kurssin esittely

Bookmark this page

Tämä kurssi johdattaa kävijänsä konenäön perusteisiin. Kurssi on jaoteltu neljään kokonaisuuteen.

1. Kamerat
2. Objektiivit
3. Valaistus
4. Konenäkömenetelmät

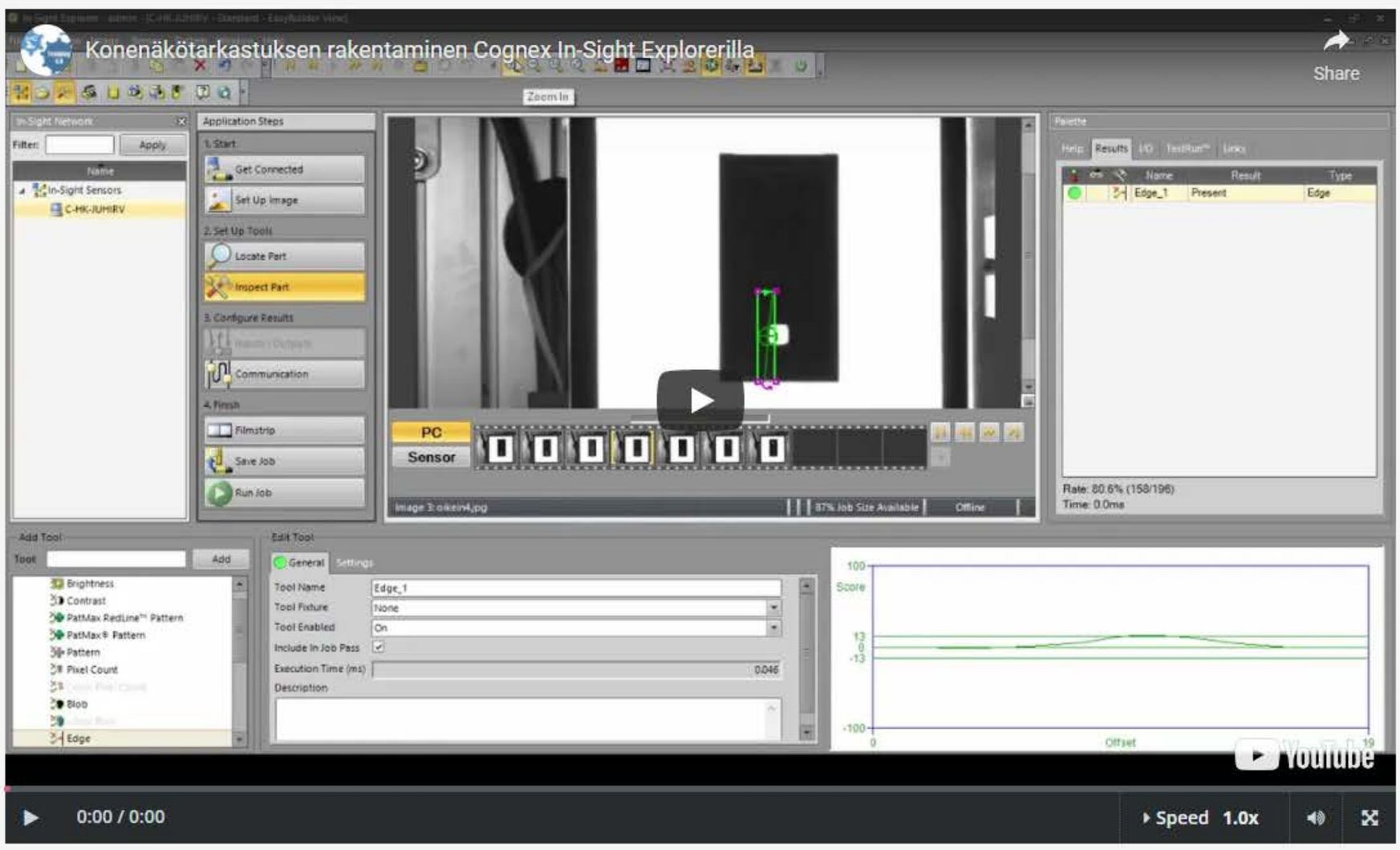
Ensimmäiset kolme kokonaisuutta esittelevät kattavasti kuvaamiseen tarvittavat laitteet. Viimeinen kappale esittelee taas itse konenäkömentelmän rakenteen eli periaatteet siihen, miten kuvasta saadan informaatiota, jota voidaan käyttää hyödyksi päätöksenteossa.

STAFF DEBUG INFO

Video: tarkistusrutiinin rakentaminen älykameralle

Bookmark this page

Video: tarkistusrutiinin rakentaminen älykameralle



STAFF DEBUG INFO

Konenäkömenetelmän rakenne

Bookmark this page

Älykameroissa tyypillinen tarkastusrutiini koostuu kahdesta pääaskeleesta:

1. Kohteen paikoitus
2. Kohteesta tehtävät tarkastukset

Jos tarkastettavat osat liikkuvat paleteissa tai robotti tuo osat kameran tarkastettavaksi, samat alueet ovat aina samassa kohdassa kuvaa. Tälloin osaa ei tarvitse erikseen paikoittaa, vaan voidaan tehdä samat tarkastukset samoissa kohdissa kuvaa. Jos taas tarkastettavat osat liikkuvat esimerkiksi hihnakuljettimella, ne voivat tulla kameran alle eri orientaatiossa ja eri kohdassa kuvaa. Tälloin osa pitää ensin paikoittaa kuvassa, jotta voidaan sitoa tehtävät tarkastukset osan koordinaatistoon. Osasta tehtävät tarkastukset voivat liittyä esimerkiksi

1. Tietyltä alueelta löydettäviin reunoihin ja niiden voimakkuuteen tai suoruuteen
2. Tietyltä alueelta löydettäviin ympyrämäisiin muotoihin ja niiden halkaisijaan
3. Tietyn alueen kontrastin vaihteluihin
4. Tietyllä alueella olevien ympäristöaän kirkkaampien tai tummempien muotojen kokoon
5. Tietyllä alueella olevaan väriin
6. Tietyn piirteen puuttumiseen

Yleisesti konenäköalgoritmilla voidaan sanoa olevan seuraavat viisi vaihetta:

1. Kuvanotto
2. Esikäsittely
3. Segmentaatio
4. Analyysi
5. Toiminta

Konenäkömenetelmän rakenne.

Älykameroiden tapauksessa osa valmiista tarkastuksista suorittaa käytännössä useamman vaiheen kerralla. Tässä osiossa käydään lyhyesti läpi päävaiheet

Kuvanotto

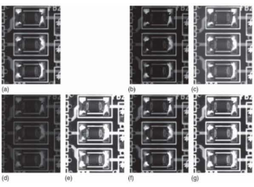
Kuvanotossa pyritään saamaan mahdollisimman tarkka, virheetön ja hyväkontrastinen kuva käyttämällä kunnollista valaistusta, vaikuttamalla mahdollisuuksien mukaan taustaan sekä käyttämällä riittävän hyvää optiikkaa ja kameraa. Tällä pyritään minimoimaan kuvalle tehtävä laskenta ja näin tekemään tarkastuksesta mahdollisimman nopea.

Esikäsittely

Esikäsittelylla parannetaan kuvaa, korostetaan tiettyjä piirteitä tai häivytetään jotain piirteitä. Kuvausolosuhteilla pyritään minimoimaan esikäsittelyn tarve. Esikäsittelylllä voidaan esimerkiksi

1. Parantaa kontrastia
2. Poistaa kohinaa
3. Korostaa reunoja

Seuraavat kuvat esittelevät näitä vaiheita esikäsittelytoimintoja.



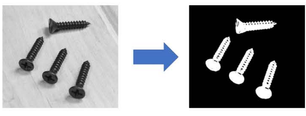
Kuvan kirkkauteen ja kontrastiin liittyviä esikäsittelyitä (kuvalähde: Steger, 2017). Alkuperäinen kuva (a), madallettu kirkkaus (b), nostettu kirkkaus (c), madallettu kontrasti (d), nostettu kontrasti (e), harmaasävyjen normalisointi (f) ja parannettu harmaasävyjen normalisointi (g).

Yksityiskohta, jossa näkyy kohinainen reuna, ja reuna, josta kohina on poistettu (kuvalähde: Steger, 2017).

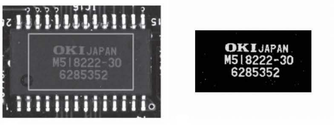
Vasemmalla alkuperäinen kuva ja oikealla kuva, josta on korostettu vaakasuorat reunat ja häivytetty muut.

Segmentaatio

Segmentaation tarkoitus on erottaa kuvasta toisistaan oleelliset asiat eli etuala ja tausta. Usein segmentaation tulos on mustavalkoinen kuva (ns. binäärikuva), jossa olennaiset asiat ovat valkoisella ja muu on mustalla. Tällaisesta binäärikuvasta voidaan helposti etsiä valkoisia alueita eli blobeja (binary large object) ja mitata seuraavassa vaiheessa niiden ominaisuuksia. Seuraavassa on esitelty muutama binäärisiksi segmentoitu kuva. Segmentaatiota voidaan helpottaa hyvällä valaistuksella ja riittävällä kontrastilla.



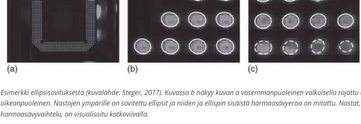
Esimerkki segmentoinnista.



Toinen esimerkki segmentoinnista (kuvalähde: Steger, 2017). Vasemmanpuolimmaisen kuvan suorakulmainen kiinnostusalue on segmentoituna oikeanpuoleisessa kuvassa.

Analyysi

Analyysivaiheessa segmentoitua kuvaa tai sen segmetoituja yksityiskohtia voidaan analysoida geometrisesti eli laskea niiden pinta-ala, piiri tai halkaisijaa, sovittaa niiden ympärille ellipsiä, ympyrää tai rajaavaa suorakulmiota tai sovittaa niiden reunoihin viivaa tai ympyrää. Näin saadaan tietoa alueen ominaisuuksista. Jos pikseli-millimetrisuhde on selvitetty käyttämällä kalibrointiruudukkoa tai tunnettua kappaletta, voidaan mittauksissa käyttää metrisiä mittoja.



Esimerkki ellipsisovituksesta (kuvalähde: Steger, 2017). Kuvassa b näkyy kuvan a vasemmanpuoleinen valkoisella rajattu alue ja kuvassa c oikeanpuoleinen. Nastojen ympärille on sovitettu ellipsit ja niiden ja ellipsin sisästä harmaasävyeroa on mitattu. Nastat, joissa on liian iso harmaasävyvaihtelu, on visualisoitu katkoviivalla.

Esimerkki viivan sovituksesta (kuvalähde: Steger, 2017)

Esimerkki ympyrasovituksesta (kuvalähde: Steger, 2017).

Toiminta

Analyysin tulosten perusteella toimitaan sen mukaisesti. Jos on tarkoitus tarttua kappaleeseen, analyysi antaa vaikkapa kappaleen keskikohdan, johon sitten imukuppitarttuja tässä vaiheessa ohjataan. Jos on tarkoitus tarkastaa, onko kappale viallinen, analyysin näin osoittaessa viallinen kappale ohjataan hylkyyn.

Lähteet:

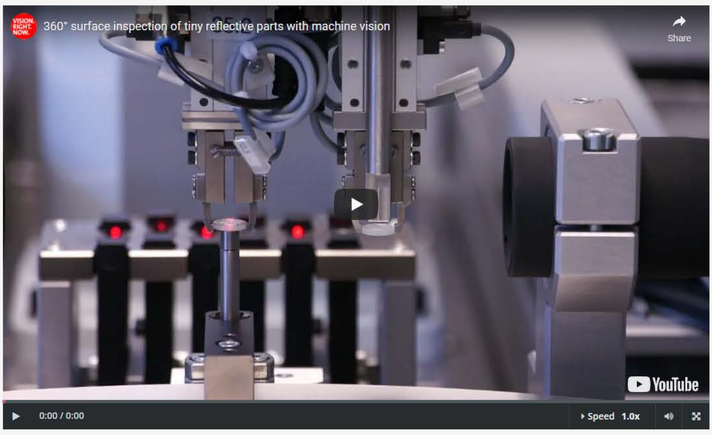
Steger, C. (2017). Machine vision algorithms. Teoksessa: Hornber, A. (toim.), *Handbook of machine vision* (s. 505 - 698, 2. painos). Weinheim: Wiley-VCH.

STAFF DEBUG INFO

Videoesimerkkejä

Bookmark this page

Video: pienten kiiltävien osien pinnantarkastus



STAFF DEBUG INFO

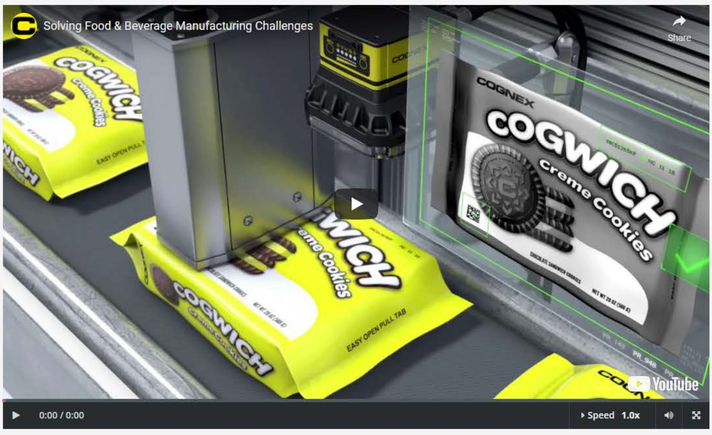
Video: pinnoituksen ja mittatarkkuuden tarkastus

STAFF DEBUG INFO

Video: poimintasovellus robotilla

STAFF DEBUG INFO

Video: elintarviketeollisuuden laadunvalvontaa



STAFF DEBUG INFO

Objektiivin mitoitus ja valinta

Bookmark this page

Konenäkösovelluksessa valittavan objektiivin polttovälin valintaprosessi lähtee liikkeelle siitä, että tunnetaan:

- Kuva-alue (FOV): kohteen koko + marginaali paikan ja orientaation vaihtelulle
- Käytettävä kamera
  - Resoluutio
  - Kennon koko
  - Pikselien koko
  - Kiinnitystyyppi
- Kuvausetäisyys

Netistä löytyy useita laskureita, joilla voidaan selvittää sovellukseen optimaalisin objektiivin polttoväli esim. kuva-alueen, kennon koon ja kuvausetäisyyden perusteella. Objektiiveja löytyy kuitenkin tavallisesti vain yleisillä "standardipolttoväleillä" (esim. 8 mm, 12 mm, 16 mm, 25 mm), jolloin optimaalisin polttoväli osua monesti kahden eri polttovälin välille. Yleensä laskurit ottavat tämän huomioon, ja tarjoavat kyseisen valmistajan tekemiä lähimpiä standardipolttovälin objektiiveja.

Esimerkki: Laskennallisesti optimaalisin polttoväli tiettyyn sovellukseen on 29mm. Lähimmät vaihtoehdot ovat 25 mm (isompi kuva-alue) ja 35 mm (kapeampi kuva-alue).

- Jos valitaan 25 mm objektiivi, voidaan kameraa ja kohdetta tuoda lähemmäs toisiaan
- Jos valitaan 35 mm objektiivi, voidaan kuvausetäisyyttä vastaavasti kasvattaa

Jos kuvausetäisyyttä ei voi muuttaa, yksi ratkaisu on käyttää loitonnusrenkaita eli pieniä renkaita, jotka kierretään kameran ja objektiivin väliin. Niiden käytöstä voi tosin seurata muita haittoja:

- Loitonnusrenkaat pienentävät FOVia.
- Loitonnusrenkaat muuttavat objektiivin tarkennusaluetta (= voidaan tarkentaa lähempänä oleviin kohteisiin).
- Loitonnusrenkaat pienentävät suurennosta (sitä enemmän, mitä pidempi loittorengas).

Loitonnusrenkaita (kuvalähde: www.photokonnexion.com)

Tavallisesti objektiivien teknisissä tiedoissa kerrotaan mille megapikseliresoluutioille objektiivi on enimmillään tarkoitettu (esim. max 2 Mpix). Vielä oleellisempaa on kuitenkin se minkä kokoisia kameran pikselit ovat. Esimerkiksi Sonyllä on kaksi resoluutioltaan identtistä, mutta fyysiseltä kooltaan erikokoista kennoa, ICX 285 ja ICX 267. ICX 285:ssa pikselikoko on 6,5 um ja ICX 267:ssa 4,65 um. Vaikka kennojen resoluutio on sama, ICX 267:n pikselikoko on pienempi ja se edellyttää korkeampilaatuista optiikkaa. Tietyn objektiivin suorituskyky on siis erilainen kameroilla, joilla on sama resoluutio, mutta erikokoiset pikselit.

Seuraavien linkkien takana on eri valmistajien tarjoamia objektiivin mitoitustyökaluja:

- Edmund Optics
- Basler
- Kowa

Näiden lisäksi objektiiveja valmistavat mm. Fujinon, Tamron, Pentax, Navitar ja Schneider.

Objektiivit voidaan hinnan (ja suorituskyvyn) mukaan jakaa karkeasti seuraaviin luokkiin:

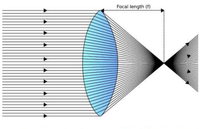
- Turvakameralinssit (20-100 €)
- Yleiset teollisuusautomaatiolinssit (100-300 €)
- 2-5 MPx teollisuusautomaatiolinssit (300-600 €)
- Korkealaatuiset linssit (600 – 1200 €)
- Erikoislinssit (telesentriset, mikroskoopit) (1200-5000 €)

STAFF DEBUG INFO

Polttoväli

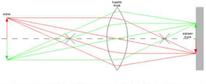
Bookmark this page

Optiikassa polttoväli kertoo, kuinka paljon linssi kokoaa tai hajottaa valoa. Kaikki linssiin kaukaisuudesta saapuvat (yhdensuuntaiset) valonsäteet kohtaavat polttopisteessä. Alla oleva kuva esittää tämän.



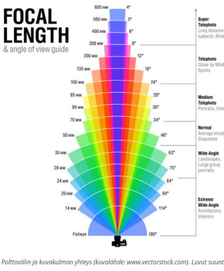
Periaatekuva linssistä ja polttovälistä (kuvalähde: Wikipedia Commons). Valonsäteet kohtaavat polttopisteessä, joka on polttovälin pässä linssin puolestavälistä.

Linssi taittaa valoa niin, että yhdestä esineen osasta lähteneet valonsäteet kulkevat yhden, tietyllä etäisyydellä linssin takana olevan pisteen kautta. Jos tämä piste on kameran kennolla, siinä nähdään esineen osan kuva tarkasti. Tällöin siis kuva on *fokuksessa*. Jos kenno on tämän pisteen edessä tai takana, kuva on epätarkka. Alla oleva kuva auttaa hahmottamaan tätä.



Periaatekuva linssistä ja kuvanmuodostuksesta (kuvalähde: Helsingin yliopisto, 2015). Kohde vasemmalla ja muodostuva kuva oikealla.

Kameran objektiivien tapauksessa polttovälі kertoo objektiivin kuvakulman. Polttovälі kerrotaan millimetreissä. Mitä pidempi polttovälі, sitä kapeampi kuvakulma. Mitä lyhempi polttovälі, sitä lähempänä kamera voi olla kohdetta, että saavutetaan yhtä suuri näkökenttä/kuva-ala (FOV). Alla oleva kuva auttaa hahmottamaan tätä. Sitä seuraava kuva esittelee saman kohteen kuvaamista kahdella eri polttovälin objektiivilla.



Polttovälin ja kuvakulman yhteys (kuvalähde: www.vectorstock.com). Luxut suuntaa-antavia.

Esimerkki saman kohteen kuvaamisesta kahden eri polttovälin optiikoilla. Molemmilla saadaan sama näkökenttä (keskellä), mutta kuvausetäisyys on hyvin eri. Vasemmalla objektiivin polttovälі on 16 mm ja kuvausetäisyys on 50 cm, oikealla polttovälі on 50 mm ja kuvausetäisyys 160 cm.

Suuren polttovälin hyöty on, että kamera saadaan kauemmas kohteesta, jolloin vaikkapa robotti mahtuu puuhastelemaan kohteen kanssa paremmin. Suurta kuvausetäisyyttä käyttämällä myös perspektiivin vaikutus pienenee, jolloin esim. kohteessa olevia reikiä on helpompi mitata. Seuraava kuva havainnollistaa kuvausetäisyyden merkitystä perspektiiviin.

Polttovälin ja kuvausetäisyyden merkitys perspektiiviin (kuvalähde: www.expertphotography.com).

Polttovälin säädettävyyden perusteella objektiivit voidaan jaotella kolmeen tyyppiin: kiinteätarkenteisiin (fixed-focus), kiinteän polttovälin (fixed focal length, prime lens) objektiiveihin ja muuttuvan polttovälin objektiiveihin eli ns. zoom-objektiiveihin.

Kiinteätarkenteinen objektiivi

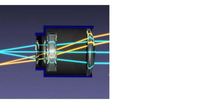
Kiinteätarkenteisessa (fixed-focus) objektiivissa on kiinteä polttovälі eikä linssiä pysty liikuttamaan. Niinpä objektiivi tarkentaa aina samalla etäisyydella, ja eri tasolle tarkentaakseen koko kamera pitää liikuttaa. Kiinteätarkenteisia objektiiveja käytetään esim. mikroskoopeissa ja älypuhelinten etukameroissa. Näissä voidaan olettaa kuvattavan kohteen olevan aika lailla samalla etäisyydella (lisäksi kännykän etukameroissa syväterävyysalue eli yhtä aikaa tarkkana näkyvä syvyys on hyvin korkea). Kiinteätarkenteisia objektiiveja ei käytännössä ole tarjolla konenäköön, vaan valinta tehdään kiinteän polttovälin ja muuttuvan polttovälin objektiivien välilta. Alla olevassa kuva esittelee muutaman mikroskooppiobjektiivin.

Mikroskooppiobjektiiveja (kuvalähde: www.ebay.com).

Kiinteän polttovälin objektiivi

Kiinteäpolttovälisissä (fixed focal length, prime lens) objektiiveissa on nimensä mukaisesti myös kiinteä polttovälі, mutta tarkennusetäisyyttä voi muuttaa liikuttamalla linssiä objektiivin sisässä. Konenäössä käytetään tyypillisesti kiinteäpolttovälisiä objektiiveja. Niissä on riittävästi säätövaraa muuttuvien olosuhteiden varalta eikä zoomausta yleensä tarvita. Normaaliobjektiiviksi kutsuttaan 50 mm polttovälillistä kiinteäpolttovälistä objektiivia. Alla oleva kuva näyttää esimerkin kiinteäpolttovälisestä objektiivista. Sitä seuraava animaatio havainnollistaa kiinteäpolttovälisellä objektiivilla tarkentamista.

Kiinteäpolttovälinen objektiivi (kuvalähde: www.ricoh-iosd.eu). Objektiivissa on kaksi kierrettävää säätörengasta. Sisemmällä (eli kuvassa alemmalla) säädetään objektiivin aukkoa ja ulommalla tarkennusta. Ärrettömän merkki tarkoittaa, että objektiivi on ryt tarkennettu kaukaisuuteen. Yläreunassa teksi 12 mm kertoo objektiivin polttovälin ja 1:1.4 aukkoluvun (lista lisää seuraavassa osiossa).



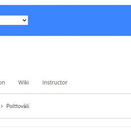
Kiinteäpolttovälisellä objektiivilla tarkentamista (yksinkertaisuuden vuoksi vain yksi linssi piirrettynä). Tarkennuksella voidaan säätää linssin etäisyyttä kameran kennosta. Etäisyys vaikuttaa siihen, millä etäisyydellä objektiivista oleva kappale näkyy tarkkana kuvassa. Jos linssin muodostama kuva ei muodostu kameran kennolle, ei se näy tarkkana kameran kuvassa. Kohde saadaan näkymään kuvassa pienempänä tai suurempana vain liikuttamalla kameraa kauaemmas tai lähemmäs kohdetta ja tarkentamalla kuva tarkaksi. Mitä lyhempi polttovälі, sitä lähempänä kohdetta kamera voi olla niin, että kuva on saadaan vielä tarkaksi.

Muuttuvan polttovälin objektiivi (zoom-objektiivi)

Muuttuvan polttovälin objektiivissa eli zoom-objektiivissa on monimutkaisempi linssirakenne, jonka takia objektiivin efektiivistä polttovälіä pystyy muuttamaan ja näin samaan samalla etäisyydellä olevasta kohteesta kuvassa pienempi tai suurempi. Monimutkaisemman rakenteeessa vuoksi zoom-objektiivit ovat kalliimpia kuin kiinteän polttovälin objektiivit. Muuttuvan polttovälin objektiiveja käytetään harvemmin konenäössä, sillä yleensä suurennusta ja näkökenttää ei haluta muuttaa mittauksen aikana. Joissain erikoissovelluksissa saatetaan käyttää motorisoitua zoom-objektiivia, jonka zoomausta ja tarkennusta voidaan ohjata. Alla oleva kuva näyttää esimerkin muuttuvan polttovälin objektiivista, sitä seuraava kuva havainnollistaa muuttuvan polttovälin objektiivin rakennetta ja viimeinen animaatio havainnollistaa muuttuvan polttovälin objektiivin toimintaa.

Esimerkki muuttuvan polttovälin objektiivista (kuvalähde: www.edmundoptics.com). Lisänä kiinteäpolttovälіseen objektiiviin verrattuna on yksi säätörengas, jolla säädetään suurennusta.

Muuttuvan polttovälin objektiivin rakenne.



Muuttuvapolttovälisen objektiivin toimintaperiaate havainnollistettuna (kuvalähde: Wikipedia Commons). Kenno kuvassa vasemmalla. Mosimutkaisemman rakenteessa ensiksi objektiivilla saadaan muuttuus itse polttovälіä ja näin suurennettua samalla kuvausetäisyydellä olevaa kohdetta kuvassa (kohteesta lähevät keltainen ja sininen säde liikkuvat kennolla eri etäisyydelle toisistaan = kohteen koko kuvassa muuttuu).

Lähteet:

Edmund Optics. Undestanding focal length and field of view. https://www.edmundoptics.co.uk/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-focal-length-and-field-of-view/

Helsingin yliopisto. Fysiikan laitos. (2015). Taittuminen ja kuvanmuodostus. http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/12kokon/luento.html

Sopivuus kameran kanssa

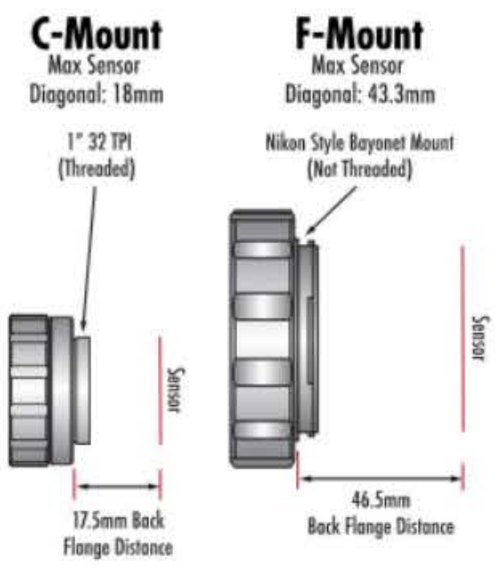
Bookmark this page

Objektiivin tiedoissa mainitaan sopiva kennokoko (esim. 1/3" – 2/3"). Jos objektiivi on tarkoitettu pienelle kennokoolle ja käytössä on isokennoinen kamera, kuva-alan reuna-alueet näkyvät tummina ja epäselvinä. Jos taas objektiivi on tarkoitettu isolle kennokoolle ja käytössä on pienikennoinen kamera, osa objektiivin kuva-alueesta jää käyttämättä. Alla oleva kuva havainnollistaa tätä.

Havainnekuva epäsopivista optiikoista ja kennoista.

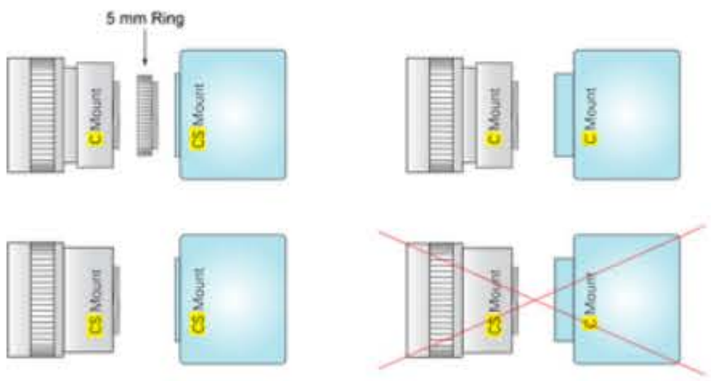
Objektiivi kiinnitetään kameraan kierteillä: kamerassa on sisäkierre ja objektiivissa ulkokierre. Yleisimpiä kiinnityksiä ovat C-, CS- ja F-mount, joista C ja CS ovat yleisimmät. F-mountia käytetään hyvin isojen kennokokojen kanssa. Alla olevista kuvista ensimmäisessä näkyy objektiivin kiinnityksen ulkokierre ja toisessa vertaillaan C- ja F-mountia toisiinsa.

Kiinnityksen kierteet näkyvissä.



C-mountin ja F-mountin vertailua (kuvalähde: www.edmundoptics.com).

CS-mount on käytännössä sama standardi kuin C-mount, mutta takimmaisen linssin etäisyys kameran kennoon on pienempi (12,256 mm vs. 17,256 mm). CS-mount-tyyppisissä kameroissa voidaan käyttää sekä C- että CS-mount-mallisia objektiiveja, mutta C-mount-objektiivien kanssa tarvitaan 5 mm jatkoputki. C-mount-tyyppisissä kameroissa ei voi käyttää CS-mount-tyyppisiä objektiiveja. Tällöin kuvaa ei saa fokusoitua, koska objektiivin kameran puoleinen pääty tulee liian lähelle kameran kennoa. Fokusoinnista lisää seuraavassa osiossa. Seuraava kuva havainnollistaa C- ja CS-mountin eroa.



C- ja CS-mountin ero.

Lähteet:

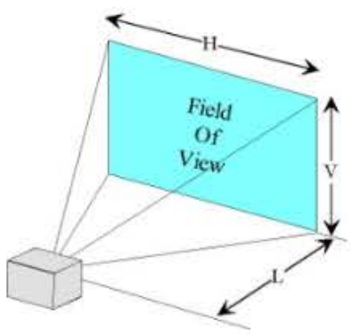
Edmund Optics. Lens Mounts. https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/lens-mounts/

STAFF DEBUG INFO

Kuva-ala

Bookmark this page

Objektiivin valinta aloitetaan yleensä päättämällä kuva-alan (field of view, FOV) koko. Tämä tarkoittaa kameran "näkemän" suorakulmaisen alueen kokoa tietyllä etäisyydellä. Valittu kuva-alue pitäisi olla sellainen, että kuvattava kohde mahtuu kuvaan. Tässä pitää huomioida myös kohteen paikan ja orientaation vaihtelut, eli kuva-alaa ei kannata rajata liian tiukaksi. Kuva-ala ilmaistaa millimetreinä leveys kertaa korkeus (mm x mm).



Havainnekuva kuva-alasta (kuvalähde: www.tlvexp.ca)

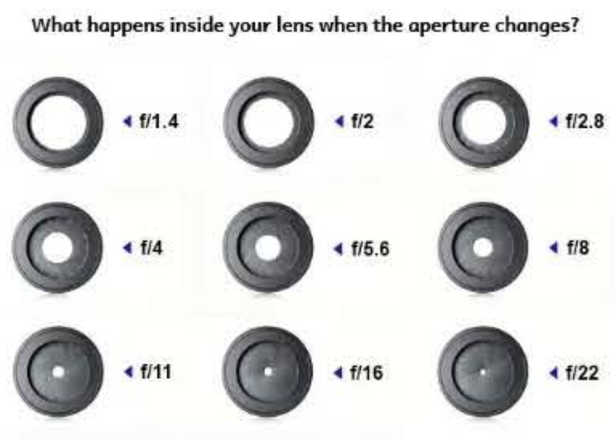
Laskuri kuva-alan selvittämiseen, kun tunnetaan kuvausetäisyys, kennon koko ja objektiivin polttoväli, löytyy esim. Vision Doctorin sivuilta. Vastaavia on useamman kamera- ja objektiivivalmistajan sivuilla. Kun polttoväli kaksinkertaistuu muiden parametrien pysyessä vakiona, kuva-alue puolittuu. Sama pätee myös päinvastoin, eli polttovälin puolittuessa kuva-ala kaksinkertaistuu. Kuvausetäisyyden kaksinkertaistamisella/puolittamisella on vastaava vaikutus kuva-alan kokoon.

STAFF DEBUG INFO

Aukkosuhde (f-luku)

Bookmark this page

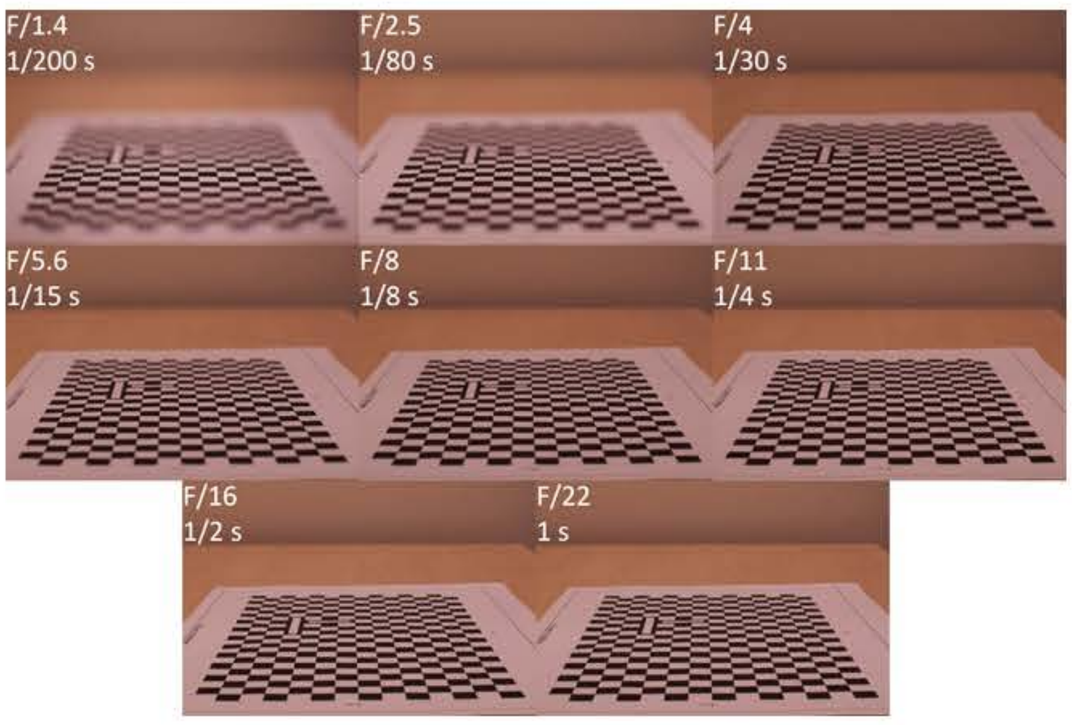
Objektiivissa on sisään tulevaa valon määrää rajoittava himmennin, jonka aukkoa voi säätää. Aukkosuhde (f-luku) kuvaa polttovälin ja himmentimen aukon koon (aperture) suhdetta, ja se merkitään esim. f/1.4. F-luvun arvo kertoo, miten paljon valoa pääsee linssin läpi kennolle, kun aukko on täysin auki. Mitä pienempi F-luku, sitä isompi aukko suhteessa polttoväliin, parempi valovoima ja lyhyempi valotusaika. Kulloinkin käytettävän aukkoluvun säätöön on objektiivissa erillinen rengas, jossa skaalaa voi olla esim. f/1.4 ... f/32. Oheisessa kuvassa näkyy yleisimmät aukkokoot ja arvon muuttamisen vaikutus himmentimen aukon kokoon. Askeleiden välillä linssin läpi pääsevän valon määrä puolittuu/kaksinkertaistuu.



Himmennin eri aukkosuhteella.

Valovoiman lisäksi käytetty f-luku vaikuttaa syväterävyyteen (depth of field, DOF). Syväterävyysalue on syvyyssuuntainen alue, jonka sisällä olevat kohteet ovat teräviä ja kunnolla tarkentuneita kameran kuvassa. Mitä pienempi aukkosuhde (= isompi himmentimen aukon koko), sitä lyhyempi syväterävyysalue. Pienellä aukon koolla saadaan pitkä syvyysterävyysalue, mutta joudutaan käyttämään vastaavasti pidempää valotusaikaa tai tehokkaampaa valonlähdettä. Alla olevat kuvat havainnollistavat tätä.

Havainnekuva syväterävyysalueesta.



Sama kohde kuvattuna eri aukkosuhteella ja valotusajalla. Syväterävyysalue ja valotusaika kasvaa aukkoluvun pienetessä.

Mikropiiri kuvattuna eri aukkosuhteella ja valotusajalla.

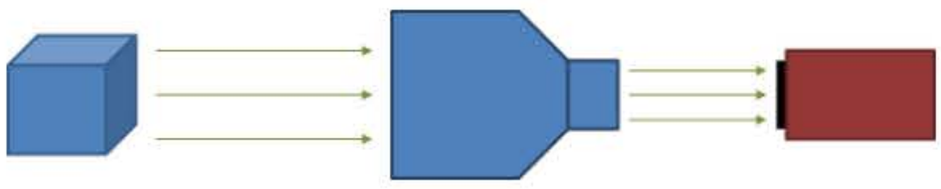
STAFF DEBUG INFO

Telesentriset objektiivit

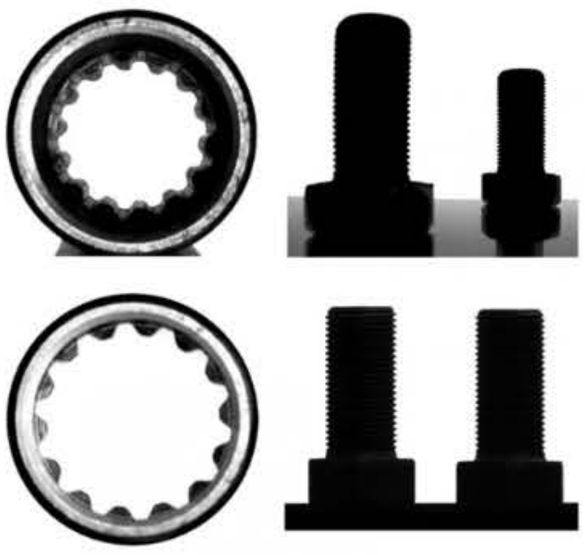
Bookmark this page

Kennojen resoluutioiden kasvamisen myötä erilaiset mittaussovellukset ovat yleistyneet merkittävästi viimevuosina. Suurta tarkkuutta vaativissa konenäköpohjaisissa mittauksissa käytetään telesentristä optiikkaa. Telesentriset objektiivit eroavat tavallisista objektiiveista siten, että niiden läpi kameran kennolle projisoidussa kuvassa ei ole perspektiiviä. Objektiiville kohtisuorassa saapuvat valonsäteet osuvat myös kameran kennolle kohtisuorassa. Eli kennolle saapuvat vain säteet, jotka ovat likimain yhdensuuntaisia objektiivin optisen akselin kanssa. Seuraavat kuvat auttavat hahmottamaan telesentristen objektiivien toimintaa.

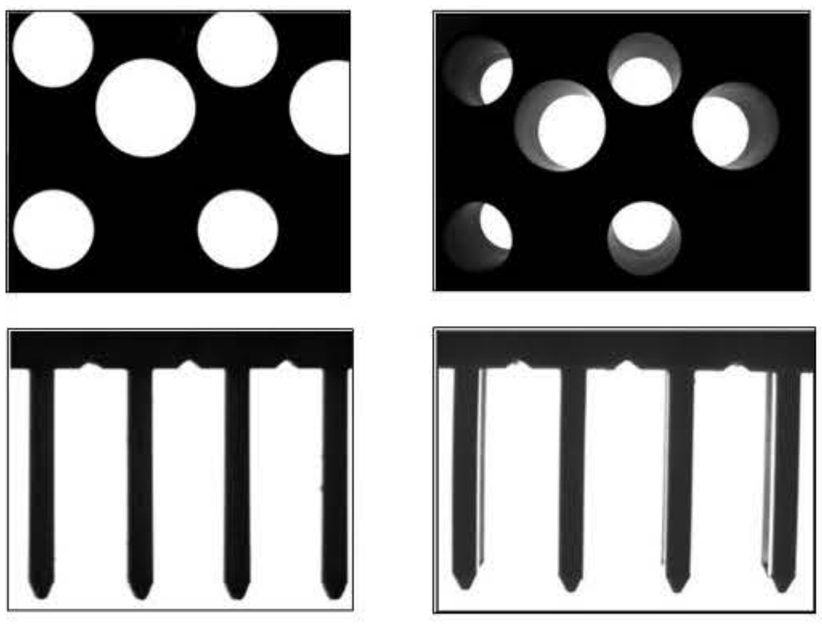
Telesentrinen objektiivi (kuvalähde: www.opto-engineering.com).



Telesentristen objektiivien toimintaperiaate: kohtisuorassa objektiiville saapuvat valonsäteet saapuvat kohtisuorassa myös kameran kennolle.



Esimerkki telesentrisen objektiivin tuottamasta kuvasta (kuvalähde: www.opto-engineering.com). Yllä oleva kuva on otettu tavallisella objektiivilla, alla oleva telesentrisellä objektiivilla. Kuvasta katoaa perspektiivi



Toinen esimerkki telesentrisen objektiivin ottamista kuvista (kuvalähde: www.vision-control.com). Oikealla tavallisella objektiivilla otetut kuvat, vasemmalla telesentrisellä objektiivilla otetut kuvat.

Perspektiivittömyys mahdollistaa tarkkojen mittausten tekemisen, koska perspektiivin aiheuttamat vääristymät saadaan eliminoitua. Toinen telesentrisistä objektiiveista saatava etu on se, että kuvattavat kohteet ovat samankokoisia, vaikka niiden etäisyys objektiivista muuttuu. Tästä seuraa se, että kohde saadaan mitattua tarkasti, vaikka sen etäisyys objektiiviin vaihtelee.

Telesentristen linssien käyttömahdollisuudet ovat isojen kappaleiden kohdalla rajalliset, sillä kuvattava kohde voi olla vain linssin kokoinen. Telesentriset objektiivit eivät myöskään ole "yleiskäyttöisiä" vaan objektiivi ja sen parametrit valitaan tarkasti kulloinkin kyseessä olevan sovelluksen mukaan. Objektiiveilla on

- Kiinteä kuvausetäisyys
- Kiinteä aukkoarvo
- Kiinteä syväterävyysalue

Telesentristen objektiivien hinnat ovat myös tavallisia objektiiveja kalliimmat (> 1000 €).

STAFF DEBUG INFO

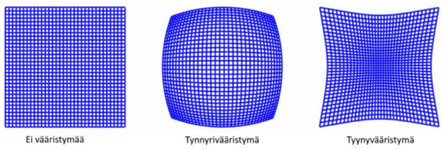
Linssin virheet

Bookmark this page

Linssi tuo aina mukanaan virhettä muodostuneeseen kuvaan. Mitä halvempi ja heikkolaatuisempi linssi, sitä enemmän se tuottaa virhettä. Tässä käsitellään lyhyesti yleisimmät linssistä aiheutuvat virheet.

Linssivääristymä

Linssivääristymässä suorat viivat näkyvät kuvassa käyristyneinä. Vääristymää on kahta tyyppiä: tynnyrivääristymää ja tyynyvääristymää. Tyynyvääristymää aiheutuu tavallisesti tele- eli kauko-objektiiveilla. Tynnyrivääristymää vastaavasti aiheutuu laajakulma- ja kalansilmäobjektiiveilla. Kiinteäpolttovälisissä objektiiveissa vääristymät saavat vakioarvon, mutta vaihtuvapolttovälisissä (eli zoom-objektiiveissä) vääristymät riippuvat kulloinkin käytetystä polttovälistä. Alla oleva kuva esittelee tyyny- ja tynnyrivääristymän ja sitä seuraava kuva aidon esimerkin tyynyvääristymästä.

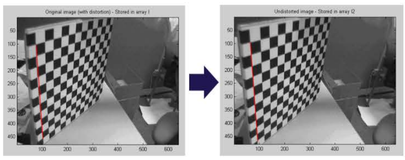


Tyynyri- ja tyynyvääristymät havainnollistettuna (kuvalähde: www.learnopencv.com).

Tyynyvääristymää kuvassa (kuvalähde: www.ephotozine.com).

Linssivääristymä aiheuttaa luonnollisesti mittausvirhettä kuvassa ja vaikeuttaa yksityiskohtien tunnistamista. Siksi se lähes aina poistetaan kuvasta konenäkösovelluksissa (jos tarkoitus on vain löytää tietty iso kappale kuvasta, se ei ole välttämätönta). Vääristymän mittaamiseen ja poistoon käytetään erilaisia shakkilautaa muistuttavia ruudukoita tai pisteistä koostuvia kuvioita. Usein riittävä tarkkuus saadaan tulostamalla kalibraatioruudukko paperille, mutta tällöin taustan täytyy olla tasainen, että ruudukko pysyy suorassa. Metallille tulostettuja kalibraatiokohteita voi tilata linssin valmistajilta tai erillisiltä palvelutarjoajilta (esim. www.calib.io). Myös metallille tulostavia valokuvaamoita voi hyödyntää tässä. Kaupallisissa konenäköohjelmistoissa on toiminnot kalibraatioruudukon luontiin ja käyttöön. Esim. Cognexin In-Sight Explorerissa nämä löytyvät valikon Set Up Image -takaa. Myös avoimen lähdekoodin ohjelmistoissa kuten OpenCV:ssä löytyy kalibrointitoiminnot valmiina. Vääristymän poistaminen on aina yksi ylimääräinen laskentavaihe ja hidastaa osaltaan tarkastusta. Alla olevat kuvat esittelevät erilaisia kalibraatiokohteita sekä esimerkin linssivääristymän korjaamisesta.

Erilaisia metallille tulostettuja kalibraatiolevytyyppejä (kuvalähde: www.calib.io).



Esimerkki tynnyrivääristymän korjauksesta (kuvalähde: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/). Punainen suora viiva havainnollistaa vääristymää. Kuvan reunat leikkaantuvat korjauksen myötä).

Vinjetointi

Kuperat linssit päästävät enemmän valoa kuvan keskialueelle kuin sen reunoille. Se takia keskialue on kuvassa aina vähän reunoja kirkkaampi. Tätä kutsutaan vinjetoinniksi, ja seuraava kuva havainnollistaa ilmiötä.

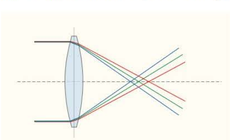
Esimerkki voimakkaasta vinjetoinnista. Tavallisilla konenäköön tarkoitetuilla objektiiveilla ilmiö ei ole läheskään näin voimakas.

Vinjetoinnista on harvemmin haittaa tavallisissa tuotannossa tehdyissä konenäkötarkastuksissa, se ei ole niissä kovin suurta, eikä sitä siis yleensä tarvitse huomioida. Vinjetointi voi kuitenkin haitata esimerkiksi näyttölaitteista tehtyjä tarkkoja kirkkausmittauksia, ja se on voimakkaampaa laajakulma- ja kalansilmäobjektiiveilla. Vinjetoinnin suuruus voidaan arvioida ottamalla kuva tasaisen valkoisesta kohteesta tasaisella valotuksella. Tätä referenssikuvaa voidaan käyttää hyväksi vinjetoinnin poistamisessa.

Väriaberraatio

Fysiikan lakien vuoksi eri aallonpituinen valo ei fokusoidu tarkasti samassa pisteessä. Tästä syntyy väriaberraatiota eli epätarkkuutta värien kohdituksessa. Alla oleva kuva näyttää esimerkin väriaberraatiosta ja sitä seuraava kuva ilmiön perustan.

Esimerkki väriaberraatiosta kuvassa (kuvalähde: www.ephotozine.com). Ilmiö on selkeimmin havaittavissa ikkunan reunoissa.



Havainnekuva väriaberraation syystä. Erivärinen valo kohdistuu hieman eri etäisyydelle linssistä.

Väriaberraatio harvemmin aiheuttaa haittaa tavallisimmissa konenäkösovelluksissa, ja laadukkaissa objektiiveissa sen määrä on vähäinen. Väriaberraatiota tarvitsee konenäössä poistaa kuvista äärimmäisen harvoin, käytännössä ei koskaan. Siitä voi kuitenkin aiheutua haittaa hyvin tarkoissa värimittauksissa.

Lähteet:

Ephotozine. What is optical distortion and how does it affect your images. https://www.ephotozine.com/article/what-is-optical-distortion-and-how-does-it-affect-your-images--24066

STAFF DEBUG INFO

Yleistä

Bookmark this page

Objektiivi kerää tarkasteltavasta kohteesta heijastuvan valon ja kohdistaa sen kameran valoherkälle kennolle. Näin kuva-alue skaalautuu kennolle sopivaksi. Tavoitteena on muodostaa mahdollisimman terävä kuva, johon kuvattava kohde mahtuu kokonaan. Objektiivi valitaan käyttötarkoituksen, kuvattavan kohteen ja kameran mukaan. Kohteen kokoa ei yleensä voida muuttaa, mutta kameran ja kohteen välistä etäisyyttä voidaan.

Havainnekuva objektiivista keräämässä kohteesta valoa kennolle

Objektiivi koostuu kahdesta tai useammasta linssistä. Objektiivin valintaan kannattaa kiinnittää huomiota, sillä se määrittää kuvausetäisyyden. Huonolaatuinen objektiivi tuottaa luonnollisesti huonolaatuisen kuvan, jossa on paljon vääristymää. Tällöin kuvaa on vaikea analysoida.

Erään objektiivin rakenne poikkileikkauksena (kuvalähde: www.imgarcade.com).

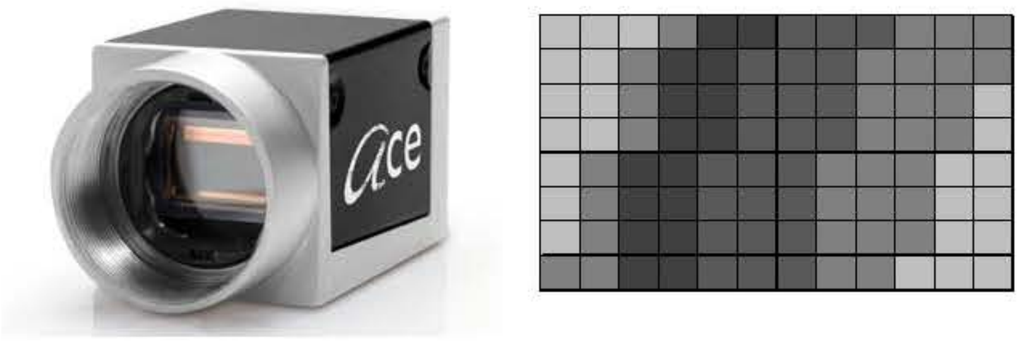
STAFF DEBUG INFO

Matriisi- ja viivakamerat

Bookmark this page

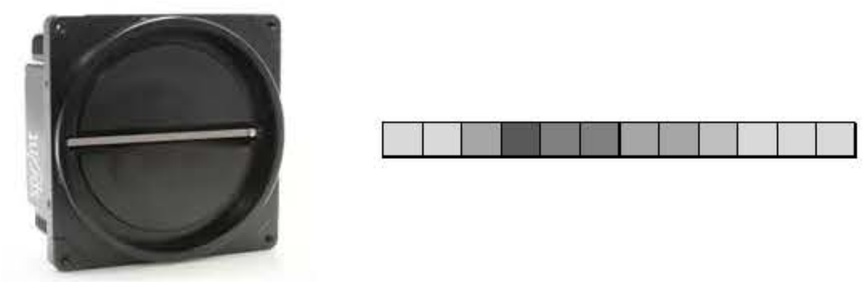
Kaikissa digitaalikameroissa on valoherkkä kenno, joka muuttaa kameralle saapuvan valon sähköisiksi varauksiksi ja edelleen kuvaksi (digitaalinen versio filmistä). Kamerat voidaan jaotella matriisi- ja viivakameroihin kennon muodon mukaan.

Matriisikameroissa kenno on muodoltaan suorakulmio (esim. kahden megapikselin kamerassa tyypillisesti 1600 x 1200 pikseliä), ja sen muodostama kuva on siis kaksiulotteinen (kooltaan myös 1600 x 1200 pikseliä). Kyseessä on ns. normaali kamera, jollaisia kaikki kuluttajakamerat ovat. Usein kuvasuhde (kuvan leveyden ja korkeuden välinen suhde) on 4:3, mutta paljon muitakin kuvasuhteita on olemassa (kuluttajakameroissa hyvin yleinen on myös 16:9). Matriisikameroiden resoluutiot vaihtelevat VGA-tarkkuudesta (640 x 480 pikseliä) 29 megapikseliin (esim. 6600 x 4400) ja erityissovelluksissa jopa vielä korkeampiin. On tärkeää muistaa, että iso resoluutio ei ole itsetarkoitus, sillä ison kuvan prosessointi on aina hitaampaa kuin pienen. Matriisikamerat ovat paljon viivakameroita yleisempiä, ja niillä kuvataan yleensä paikallaan olevia (edes hetkeksi pysähtyviä) tai hitaasti liikkuvia kappaleita.

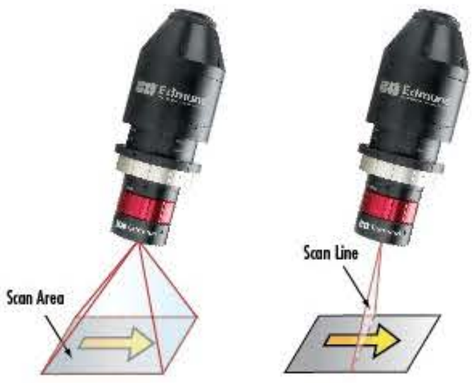


Matriisikamera (kuvalähde: www.baslerweb.com) ja sen tuottama kuva (tässä tapauksessa resoluutio on 12 x 8).

Viivakamerat kuvaavat vain yhden viivan kerrallaan. Niiden kenno on siis vain yksi rivi: resoluutio on esimerkiksi 1024 x 1 pikseliä, 2048 x 1 pikseliä jne. Viivakameroita käytettäessä joko kamera liikkuu tai (useimmiten) kohde liikkuu. Viivakameroilla siis tavallaan skannataan nopeasti liikkuvaa pitkää kohdetta kuten paperirainaa ja metallilevyä tai esim. pyörivän sylinterin pintaa. Muodostuvassa kaksiulotteisessa kuvassa vain toinen dimensio on ennaltamääritelty, toinen voidaan päättää kohteen mukaan. Viivakameralla voidaan siis kuvata suurikokoisia kohteita, jotka eivät matriisikameran kuva-alueeseen mahtuisi, tai sylinterimäisiä pintoja, joista ei matriisikameralla ole mahdollista ottaa kuvaa ilman merkittävää vääristymää.



Viivakamera (kuvalähde: www.baslerweb.com) ja sen tuottama kuva (tässä tapauksessa resoluutio on 12 x 1)



Matriisi- ja viivakameran toimintaperiaate. Vasemmalla matriisikamera ja oikealla viivakamera (kuvalähde: www.edmundoptics.com).

Valmet käyttää viivakameroita paperirainamittauksissaan (kuvalähde: Valmet).

Järjestelmäarkkitehtuurit

Bookmark this page

Konenäössä käytettävät järjestelmäarkkitehtuurit voidaan jakaa kolmeen luokkaan: PC-pohjaisiin järjestelmiin, älykameroihin ja sulautettuihin kamerajärjestelmiin. Tämä osio esittelee nämä kolme järjestelmätyyppiä.

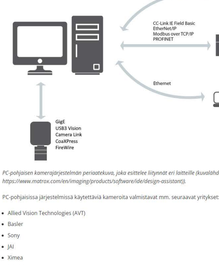
PC-pohjaiset järjestelmät

PC-pohjaisissa järjestelmissä koneenäkökamera liitetään tietokoneeseen esim. verkkokaapelin avulla, ja kamera ainoastaan ottaa kuvan ja lähettää sen tietokoneelle analysoitavaksi. Varsinainen laskenta, tuloksiin reagoiminen ja tulosten tallettaminen hoidetaan siis tietokoneohjelmassa, jonka ohjelmoija on itse kirjoittanut sovellukseen sopivaksi. Ohjelmoinnissa voidaan käyttää esimerkiksi avoimen lähdekoodin OpenCV-kirjasto tai kaupallisia ohjelmistoja kuten MVTech HALCONia tai National Instrumentsin Vision Builderia. Ohjelmoijalla on suuri vapaus mekanteemisen suhteen, mutta hänellä kyytään myös ohjelmointitaitoa ja syvällistä ymmärrystä käyttämistään menetelmistä. Samalla PC:llä voidaan tarvittaessa liittää useampia kamereita, ja PC kommunikoi myös järjestelmän muiden laitteiden kanssa eli lukee tietoa antureilta ja ohjaa valoja ja muita toimilaitteita. Kuvien siirto kamerailta PC:lle aiheuttaa järjestelmiin luonnollisesti hieman viivettä.

Gigabit Ethernet (GigE)- liitäntä on hyvin yleinen liitäntä kameran ja tietokoneen välillä. Sen etuina ovat halvat kaapelit, suuri kaapelin maksimipituus, useamman kameran liittämisen helppous sekä mahdollisuus virransyöttöön saman kaapelin avulla (Power over Ethernet, PoE). Lisäksi Ethernet-liitäntä on standardi melkein kaikissa PC:issä. Mutakin liitäntöjä toki on ja osa (esim. Camera Link) on varta vasten kameroiden tiedonsiirtoa varten kehitetty. Seuraava taulukko esittelee eri liitännät kameran ja PC:n välillä.

Liitäntä	Siirtonopeus	Kaapelin maksimipituus
Gigabit Ethernet (GigE)	1 Gb/s (125 MB/s)	100 m
FireWire	0.4 – 3.2 Gb/s (50 – 400 MB/s)	4,5 m
USB3 Vision	2.8 Gb/s (350 MB/s)	5 m (erikoiskaapelilla 8 m mahdollinen)
Camera Link	2.04/4.08/5.44 Gb/s (255/550/850 MB/s)	10 m
CoaxPress	1.25 - 12.5 Gb/s (0.156 - 1.56 GB/s)	30 m (@12.5 Gb/s) - 212 m (@1.25 Gb/s)

Seuraava periaatekuva havainnollistaa PC-pohjaisen kamerajärjestelmän rakennetta ja liityntöjä PC:n ja laitteiden välillä. PC on järjestelmän keskiössä ja lukee tietoa sihen kytketyistä laitteilta sekä ohjaa niitä. Jotta kommunikointi laitteiden välillä on mahdollista, tulee PC:llä olla asennettuna kyseisten laitteiden ohjelmointirajapinnat (application programming interace, API).

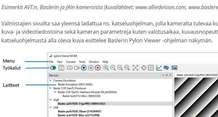


PC-pohjaisen kamerajärjestelmän periaatekuva, joka esittelee liitynnät eri laitteille (kuvalähde (mukailtu): https://www.matrox.com/en/imaging/products/software/ide/design-assistant).

PC-pohjaisissa järjestelmissä käytettävä kamerota valmistavat mm. seuraavat yritykset:

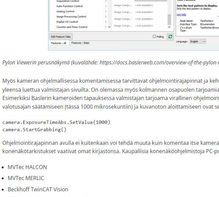
- Allied Vision Technologies (AVT)
- Basler
- Sony
- JAI
- Kinea
- HIKvision

Allaoleva kuva esittelee esimerkit AVT:n, Baslerin ja JAIn kameroista.



Esimerkit AVT:n, Baslerin ja JAIn kameroista (kuvalähteet: www.alliedvision.com, www.baslerweb.com, www.jai.com

Valmistajien sivuilta saa yleensä ladattua ns. katselusohjelman, jolla kameralta tulevaa kuvaa pystyy reaaliaikaisesti katsomaan ja tallettamaan kuva- ja videotiedostoina sekä kameran parametreja kuten valotusaikaa, kuvausnopeutta sekä kuvakokoa pystyy säätämään. Esimerkkinä katselusohjelmasta alla oleva kuva esittelee Baslerin Pylon Viewer -ohjelman näkymän.



Pylon Viewerin perusnäkymä (kuvalähde: https://docs.baslerweb.com/overview-of-the-pylon-viewer)

Myös kameran ohjelmallisessa komentamisessa tarvittavat ohjelmointirajapinnat ja kehitysympäristöt (software development kit, SDK) saa yleensä luettua valmistajan sivuilta. On olemassa myös kolmannen osapuolen tarjoamia rajapintoja sekä avoimen lähdekoodin ratkaisuita. Esimerkiksi Baslerin kameroiden tapauksessa valmistajan tarjoama virallinen ohjelmointirajapinta on nimeltään Pylon ja komennot kameran valotusajan säätämiseen (tässä 1000 mikrosekuntiin) ja kuvanoton aloittamiseen ovat seuraavat:

```
camera.ExposureTimeAbs.SetValue(1000)
camera.StartGrabbing()
```

Ohjelmointirajapinnan avulla ei kuitenkaan voi tehdä muuta kuin komentaa itse kameraa ja lukea siltä kuvia. Varsinainen kuvankäsittely ja koneäkäntarkistukset vaativat omat kirjastomsa. Kaupallisia koneenäköohjelmistoja PC-pohjaisiin kamerajärjestelmiin ovat mm. seuraavat:

- MVTec HALCON
- MVTec MERLIC
- Beckhoff TwinCAT Vision
- National Instruments Vision Builder
- Matrox Imaging Library
- Teledyne DALSA Sapera
- MATLAB Image Processing Toolbox
- Amazon Lookout for Vision (koneoppiminen)

Avoimen lähdekoodin koneenäköohjelmistoja ovat puolestaan seuraavat:

- OpenCV
- SimpleCV
- ROVIS (robottinäkö)
- TensorFlow (koneoppiminen)

PC-pohjaisten järjestelmien etuna on niiden suuri muokattavuus ja siten sovelluksen hyvin erilaisiin sovelluksiin. Huono puoli on sen sijaan järjestelmän mahdollinen monimutkaisuus sekä korkeahko asiantuntemuksen ja ohjelmointiosaamisen vaatimus käyttäjältä. Itse kamerat ovat verrattain halpoja, mutta merkittävä kustannus tulee ohjelman tekemisestä. Lisäksi pelkä kamera ei tietenkään pysty yksinään tekemään mitään, vaan lisäksi tärtyy hankkia PC. PC-pohjaiset kamerajärjestelmät ovat yleisiä mm. tutkimus- ja prototyippuvaiheissa niiden joustavuuden ja muokattavuuden takia. Myös osa räätälöityä koneenäköratkaisuita tarjoavista yrityksistä (esim. OptoFidelity ja MapVision) käyttää PC-pohjaisia kamerajärjestelmiä tuotteissaan samasta syystä. Lisäksi sovelluksissa, joissa halutaan, että sama tietokone huolehtii sekä esim. liikkeenohjauksesta että koneäkäntäsekmenasta (esim. reaaliaikasovellukset, joissa halutaan poistaa eri järjestelmien valisesta kommunikoinnista syntyvät viiveet), käytetään PC-pohjaisia kamerajärjestelmiä.

Älykamerat

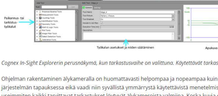
Älykamerat ovat itsenäisiä laitteita, joihin on integroitu kuvanotto, laskenta sekä liitännät muihin laitteisiin. Toisinaan myös valaisin on integroitu älykameraan. Älykamerissa ohjelma tai tarkastusrutiini rakennetaan käyttämällä valmistaman tarjoamaan grafiista käyttöliittymää (usein tarvittaessa pääsee myös ohjelmoimaan niä kerrallaan, jos se on tarpeen). Ohjelman rakentamisen ajaksi älykamera liitetään PC:hen verkkokaapelin avulla, mutta kaikki laskenta suoritetaan itse älykamerassa. Kuvat ja tulokset lähetetään vain PC:lle, jotta ohjelmoija näkee, mitä on tekemässä. Kun ohjelma on valmis, PC:tä ei enää tarvita. Alla oleva kuva näyttää esimerkin, jossa älykamera on osana tuotantolinjaa.

Älykamera jännankorkeuden mittausovellauksessa. Anturitta tulee tieto pullon saapumisesta kameran eteen, ja tämä laukaisee kuvanoton sekä ohjaa salamasuulua. Kaikki laitteet on kytketty suoraan älykameraan (kuvalähde: https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/what-is-machine-vision).

Älykamerasovelmistoja ovat mm. seuraavat:

- Cognex
- Omron
- Matrox
- Teledyne DALSA

Alla oleva kuva esittelee esimerkin Omronin, Cognexin ja Matroxin älykameroista.



Esimerkit Omronin, Cognexin ja Matroxin älykameroista (kuvalähteet: www.omron.com, www.cognex.com, www.matrox.com)

Teollisuudelle suunnuttaisa älykameroissa on valmiina yleisimmät kappaletavarateollisuudessa tarvittavat tarkastukset. Ohjelman rakentaminen on tehty käyttäjäystävälliseksi, ja se voidaan tehdä esimerkiksi rakentamalla erääntäinen lohkokaavio erilaisista ohjelmakomponenteista. Esimerkiksi Cognexin In-Sight Explorer -ohjelmalla valitaan usein ensin paikannustyökalu, jonka avulla kohde voidaan paikantaa kuvassa, ja sen jälkeen valitaan itse tarkastustyökalut, jolla tarkastetaan tietty kohta paikannetussa kohtessa. Työkalujen tarkastusalueet piirretään hiirellä näytettävän kuvan päälle ja työkalujen parametrit säädetään omissa valikoissaan. Käyttäjä näkee jokaisen muutoksen vaikutuksen tarkastusrutiinin toimintaan. Cognex In-Sight Explorerissa säädetään myös kommunikointi kameran I/O:lle eli valitaan sisäänmenot, jotka käynnistävät kuvanoton sekä ulostulot, jotka tarkastuksen lopputulos (hyväksyntä tai hylkääminen) ohjaa. Alla oleva kuva esittelee näkymän Cognex In-Sight Explorerista.

Cognex In-Sight Explorerin perusnäkymä, kun tarkastustaulukko on valittuna. Käytettävät tarkastustyökalut näkyvät vasemmassa alakulmassa.

Ohjelman rakentaminen älykamerilla on huomattavasti helpompaa ja nopeampaa kuin niä kerrallaan koodaamalla kuten PC-pohjaisen järjestelmän tapauksessa eikä vaadi niin syvällistä ymmärrystä käytettävästä menetelmistä, mutta se on myös rajoittuneempaa. Toisin useimmiten kaikki tarvittavat tarkastukset löytyvät älykamerosta valmiina. Koska kuvia ei tarvitse lähettää muualle analysoitavaksi, siirtoviiveet ovat myös alhaisempia. Älykameran etuna on lisäksi hyvä liitettävyys muihin laitteisiin sekä kompaktius. Älykamerioiden hinnat ovat usein huomattavasti (5x - 10x) korkeampia kuin vastaavan resoluution tavallisten kameroiden, mutta toisaalta älykamerissa tulee mukana kaikki tarvittava softa eikä myöskään tarvita erillistä PC:tä. Jos kohdesovelluksessa tarvitsvat tarkistukset ovat yksinkertaisia, on myös mahdollista säästää hankkimalla älykamera, jossa on suoraanpi valmiina työkaluja. Hyvin typillisesti teollisuuden tavallisissa koneenäköratsuksissa käytetään juuri älykameroita.

Sulautetut kamerajärjestelmät

Sulautetuissa kamerajärjestelmissä kamera on suoraan piirikortilla ilman kotelointia ja laskenta suoritetaan erillisellä piirikorilla, johon kamera on liitetty joko suoraan tai erityisellä lattakaapelilla. Laskennassa hyödynnetään usein GPUta tai FPGA-piiriä. Etuina sulautetuissa kamerajärjestelmissä on pieni koko, kevyys komponenttien alhainen hinta ja alhainen energiankulutus. Sulautetuissa kamerajärjestelmissä myös kuvien siirtoviiveet ovat hyvin alhaiset. Sulautetun kamerajärjestelmän tarkastukset täytyy ohjelmoida samaan tapaan kuin PC-pohjaisissa kamerajärjestelmissä. Käytettävien kirjastojen valikoima on rajutumpi, ja järjestelmien ohjelmointi vaatii paljon osaamista. Siinä missä etenkin PC-pohjainen kamerajärjestelmä ja usein myös älykamera ovat kuin tyvistäsiässä linkkuvieristä, jotka voidaan uudelleen konfiguroida uusiin tilanteisiin ja sovelluksiin, sulautettu kamerajärjestelmä kohtestaan yleensä vain yhtä tiettyä sovellusta varten, vaikka sekin on tokki uudelleen ohjelmoitavissa. Esimerkkitapauksena ovat vaikkapa lääketeollisessa käytettävät käsikäyttöiset kuvaus- ja analysointilaitteet esimerkiksi silmänpohjan kuvaamiseen tai kodin turvasovellukset. Luultavasti tutuin ja myös varmasti helppokäyttöisin esimerkki sulautetusta kamerajärjestelmästä on Raspberry Pi ja kameramoduuli.

Esimerkkejä sulautetusta kamerajärjestelmistä. Oikeanpuoleimmaisena Raspberry Pi ja sen kameramoduuli (kuvalähteet: www.baslerweb.com, www.element14.com, www.raspberrypi.com)

Lähteet:

Basler. USB 3.0 Cameras (https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/usb3-0-cameras/?creative=431361412066&keyword=usb%203.0%20Camera&matchtype=p&network=g&device=c&gclid=CjwKCAiAv_KMBhAqEiwAs-rK1ZyWaLXJ_E4RO3VVOLJ6rS4RfGXT9ZQBFTy9vBO6ARQeSAqBH8CbpQnAQ_Bw&)

Basler. What is Embedded Vision? (https://www.baslerweb.com/en/vision-campus/camera-technology/what-is-embedded-vision/)

Liu, Z., Ukida, H., Ramuhalli, P., & Niel, K. 2015. Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications. Lontoo: Springer. s. 3 - 12.

Stemmer Imaging. Cables for USB Cameras. https://www.stemmer-imaging.com/en/products/category/usb-cables/

STAFF DEBUG INFO

Kameran mitoitus ja valinta

Bookmark this page

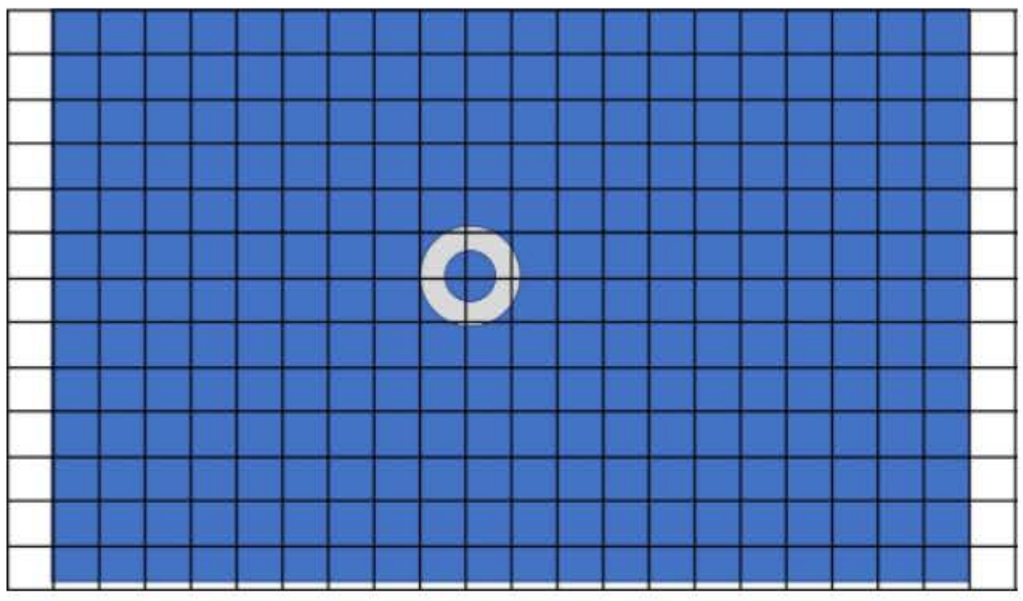
Ensiksi on syytä päättää, käytetäänkö älykameraa vai PC-pohjaista järjestelmää. Usein kappaletavaratuotannossa älykameran käytöllä päästään helpommalla. PC-pohjaista järjestelmää voi puoltaa vaatimus käyttää samaa tietokonetta useamman laitteen ohjauksessa tai erityisen joustavuuden tarve. Seuraavaksi päätetään, tarvitaanko värikameraa vai ei. Jos värien käytölle ei ole erityistä perustetta, kannattaa valita harmaasävykamera sen suuremman herkkyyden ja kuvien nopeamman käsittelyn takia. Jos kuvataan liikkuvia kohteita, tarvitaan globaali suljin (ja luultavimmin CCD-kenno). Jos kuvattava kohde pysyy paikallaan, voidaan hankkia myös rullaavan sulkimen CMOS-kennollinen kamera.

Kennon koko pikseleissä eli resoluutio valitaan kuva-alan ja kuvattavan kohteen mukaan. Mielenkiinnon kohteen tulee olla kuvassa riittävän iso eli koostua riittävän monesta pikselistä, jotta se voidaan kuvasta löytää. Pienimmän yksityiskohdan koon tulisi olla vähintään kaksi pikseliä kuvassa. Jos siis halutaan vaikka havaita naarmuja metallilevyjen pinnassa, tulisi naarmun leveyden kuvassa olla vähintään kaksi pikseliä.

Esimerkki: käytössä on 50 cm leveä hihnakuljetin. Kamera halutaan kuvaamaan kuljetinta kuljettimen suuntaisesti. Pienin yksityiskohta, joka halutaan havaita, on 1 mm.

- Käytössä pitää olla kaksi pikseliä per millimetri
- Kennon pystyresoluution tulee olla vähintään 500 mm * 2 pix / mm = 1000 pix

Alla oleva kuva havainnollistaa kennon mitoitusta.



Kennon mitoitus. Sininen alue merkitsee kuva-alaa ja harmaa prikka pienintä yksityiskohtaa, joka halutaan nähdä. Oheisella 23 x 13 -resoluution kennolla kuvattava prikka saa riittävän monta pikseliä sen havaitsemiseen kuvassa (luonnollisesti sen koon tarkkaan mittaamiseen oheinen kenno ei riitä).

STAFF DEBUG INFO

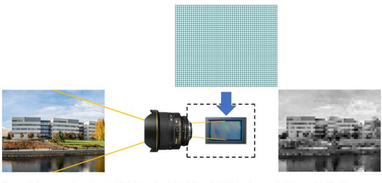
Harmaasävy- ja värikamerat sekä kuvanmuodostus

Bookmark this page

Digitaalikameroissa siis optiikka kokoaa valon kohteesta kameran valoherkälle kennolle, joka muuttaa valon varauksiksi, ja varaukset taas tulkitaan kuvaksi. Mitä enemmän kennon yksittäinen elementti tai pikseli saa valoa, sitä korkeampi varaus siihen muodostuu ja sitä korkeampi arvo tälla pikselillä on muodostuvassa kuvassa.

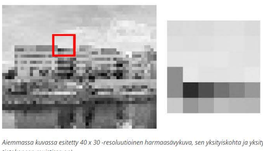
Harmaasävykamerat ja harmaasävykuvan muodostus

Kun kyseessä ovat harmaasävykamerat, matala pikseliarvo tarkoittaa tummaa harmaasävyarvoa eli kuvattavan kohteen aluetta, josta on tullut vähän valoa kennolle. Korkea pikseliarvo taas tarkoittaa vaaleaa harmaasävyarvoa eli kuvattavan kohteen aluetta, josta on tullut paljon valoa kennolle. Tavallisesti jokaista kennon pikseliä vastaa yksi pikseli muodostuvassa kuvassa. Tätä havainnollistetaan alla: jos käytetään resoluution 40 x 30 kennoa, tuloksena on kuva, jonka resoluutio on 40 x 30.



Harmaasävykuvan muodostuminen. Optiikka kokoaa valon kohteelta kennolle ja jokaista kennon pikselä vastaa yksi pikseli kuvassa.

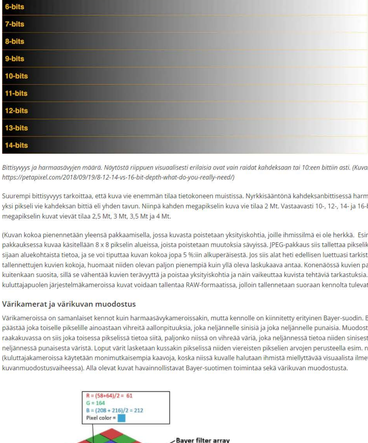
Harmaasävykuvien tapauksessa jokainen pikseliarvo on yksittäinen positiivinen kokonaisluku. Jos kamera on 8-bittinen harmaasävykamera, tarkoittaa se, että yksi pikseli voi saada $2^8 = 256$ eri arvoa. Alhaisin arvo on tällöin 0, joka tarkoittaa mustaa, ja korkein 255, joka tarkoittaa valkoista. Digitaalinen kuva on siis pohjimmiltaan kokonaislukutaulukko. Alla oleva kuva havainnollistaa tätä.



218	219	217	218	222	218
223	221	223	223	227	223
229	230	228	228	225	224
141	230	226	226	227	232
143	44	79	114	130	149
202	150	167	190	184	182

Aiemmassa kuvassa esitetty 40 x 30 -resoluutioinen harmaasävykuva, sen yksityiskohta ja yksityiskohta esitettynä pikseliarvojensa avulla (kuten se tietokoneen muistissa on).

Suurin osa harmaasävykameroista on 8-bittisiä eli niiden bittisyvyys (*bit depth*) on kahdeksan. Kuitenkin sovelluksia, joissa vaaditaan korkeampaa sävyjen erottelukykyä, varten on olemassa myös 10-, 12-, 14- ja 16-bittisiä harmaasävykamereita. Näissä harmaasävyjen määrä on vastaavasti 1024, 4096, 16 384 ja 65 536. Alla oleva kuva havainnollistaa bittisyvyyden vaikutusta harmaasävyjen määrään.



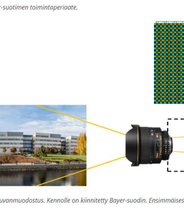
Bittisyvyys ja harmaasävyjen määrä. Näytöstä riippuen visuaalisesti eriläisiä ovat vain raidat kahdeksaan tai 10:een bittiin asti. (Kuvalähde: https://petapixel.com/2018/09/19/8-12-14-vs-16-bit-depth-what-do-you-really-need/)

Suurempi bittisyvyys tarkoittaa, että kuva vie enemmän tilaa tietokoneen muistissa. Nyrkkisääntönä kahdeksanbittisessä harmaasävykuvassa yksi pikseli vie kahdeksan bittiä eli yhden tavun. Niinpä kahden megapikselin kuva vie tilaa 2 Mt. Vastaavasti 10-, 12-, 14- ja 16-bittiset kahden megapikselin kuvat vievät tilaa 2,5 Mt, 3 Mt, 3,5 Mt ja 4 Mt.

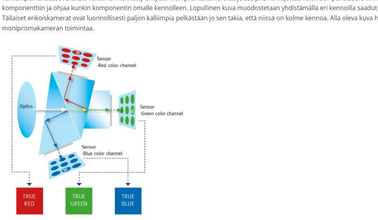
(Kuvan kokoa pienennetään yleensä pakkaamisella, jossa kuvasta poistetaan yksityiskohtia, joille ihmissilmä ei ole herkkä. Esim. JPEG-pakkauksessa kuvaa käsitellään 8 x 8 pikselin alueissa, joista poistetaan muutoksia sävyissä. JPEG-pakkaus siis tallettaa pikselikohtaisten arvojen sijaan aluekohtaista tietoa, ja se voi tiputtaa kuvan kokoa jopa 5 %:iin alkuperäisestä. Jos siis alat heti edellisen luettuasi tarkistaa koneellesi tallennettujen kuvien kokoja, huomaat niiden olevan paljon pienempiä kuin yllä olevaa laskukaava antaa. Konensäkö kuvien pakkaamista ei kuitenkaan suosita, sillä se vähentää kuvien tarvoyttä ja poistaa yksityiskohtia ja näin vaikeuttaa kuvista tehtäviä tarkastuksia. Myös kuluttajapuolen järjestelmäkameroissa kuvat voidaan tallentaa RAW-formaatissa, jolloin tallennetaan suoraan kennolta tulevat pikseliarvot.)

Värikamerat ja värikuvan muodostus

Värikameroissa on samanlaiset kennot kuin harmaasävykameroissakin, mutta kennolle on kiinnitetty erityinen Bayer-suodin. Bayer-suodin päästää joka toiselle pikselille ainoastaan vihreitä aallonpituuksia, joka neljännelle sinisiä ja joka neljännelle punaisia. Muodostuneessa raakakuvassa on siis joka toisessa pikselissä tietoa siitä, paljonko niissä on vihreää väriä, joka neljännessä tietoa niiden sinisestä väristä ja joka neljännessä punaisesta väristä. Loput värit lasketaan kussakin pikselissä niiden viereisten pikseleiden arvojen perusteella esim. niiden keskiarvona (kuluttajakameroissa käytetään monimutkaisempia kaavoja, koska niissä kuvalle halutaan ihmistä mieliyttävää visuaalista ilmeitä jo kuvanmuodostusvaiheessa). Alla olevat kuvat havainnollistavat Bayer-suotimen toimintaa sekä värikuvan muodostusta.



Bayer-suotimen toimintaperiaate.

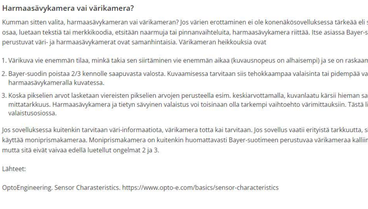


Värikuvanmuodostus. Kennolle on kiinnitetty Bayer-suodin. Ensimmäisessä vaiheessa yksittäisessä pikselissä on tietoa vain yhdestä väristä.

Tarkempia kuvaussovelluksia varten on kehitetty erityisiä monioprismakameroita, joissa prisma hajottaa valon sen punaiseen, vihreään ja siniseen komponenttiin ja ohjaa kunkin komponentin omaan kennolleen. Lopullinen kuva muodostetaan yhdistämällä eri kennoilla saadut osakuvat. Tällaiset erikoiskamerat ovat luonnollisesti paljon kalliimpia pelkästään jo sen takia, että niissä on kolme kennoa. Alla oleva kuva havainnollistaa monioprismakameran toimintaa.

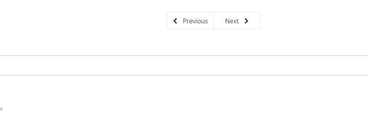
Monioprismakameran toimintaperiaate (kuvalähde: https://news.jai.com/blog/prism-area-scan-color-camera)

Värikuvan tapauksessa kutakin pikselä kuvaa kolme lukuarvoa, sen punainen (R), vihreä (G) ja sininen (B) komponentti. Puhutaan RGB-kuvasta. Tavallinen värikuva on 24-bittinen eli kukin väri esitetään kahdeksalla bitillä. Arvo nolla tarkoittaa, ettei kyseistä väriä ole pikselissä lainkaan, ja arvo 255, että kyseistä väriä on mahdollisimman paljon. Arvo (0, 0, 0) tarkoittaa mustaa väriä ja (255, 255, 255) valkoista. Arvo (255, 0, 0) on täysin punainen, (0, 122, 122) hailakan turkoosi (122, 122, 122) harmaa ja niin edespäin. Kaikki värit siis esitetään punaisen, vihreän ja sinisen yhdistelminä. Alla oleva kuva havainnollistaa pikseliarvoja valmiissa RGB-kuvassa.



24-bittinen RGB-kuva ja muutamia sen pikseliarvoja.

RGB-kuvaa voidaan ajatella kolmena päällekkäisenä kerroksena tai kanavana, joista kukin esittää yksittäistä väriä - ikään kuin kolmena muovikalvona, jotka päällekkäin lätäkästynä muodostavat itse kuvan. Tätä havainnollistetaan alla. Kukin näistä kanavaista on samanlaisia kokonaislukutaulukoita kuin yksi harmaasävykuva. 24-bittinen värikuva vie siis kolminkertaisesti tilaa tietokoneen muistissa verrattuna saman resoluution 8-bittiseen harmaasävykuvaan.



Värikuvan kanavat havainnollistettuna: punainen, vihreä ja sininen kanava.

Harmaasävykamera vai värikamera?

Kumman sitten valita, harmaasävykameran vai värikameran? Jos varien erottaminen ei ole konenäkösovelluksessa tärkeää eli siinä mitataan osaa, luetaan tekstiä tai merkkikoodia, esitään naarmuja tai pinnanvaihteluita, harmaasävykamera riittää. Itse asiassa Bayer-suotimeen perustuvat väri- ja harmaasävykamerat ovat samanhintaisia. Värikameran heikkouksia ovat

1. Värikuva vie enemmän tilaa, minkä takia sen siirtäminen vie enemmän aikaa (kuvausnopeus on alhaisempi) ja se on raskaampi prosessoida
2. Bayer-suodin poistaa 2/3 kennolle saapuvasta valosta. Kuvaamisessa tarvitaan siis tehokkaampaa valaisinta tai pidempää valotusaikaa kuin harmaasävykameralla kuvatessa.
3. Koska pikselien arvot lasketaan viereisten pikselien arvojen perusteella esim. keskiarvottamalla, kuvanlaatu kärsii hieman samoin kuin mittatarkkuus. Harmaasävykamera ja tietyn sävyinen valaistus voi toisinaan olla tarkempi vaihtoehto värimittauksiin. Tästä lisää kurssin valaistusosiossa.

Jos sovelluksessa kuitenkin tarvitaan väri-informaatiota, värikamera totta kai tarvitaan. Jos sovellus vaatii erityistä tarkkuutta, siinä voidaan käyttää monioprismakameraa. Monioprismakamera on kuitenkin huomattavasti Bayer-suotimeen perustuvaa värikameraa kalliimpi vaihtoehto, mutta sitä eivät vaivaa edellä luetellut ongelmat 2 ja 3.

Lähteet:

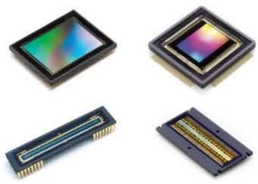
OptoEngineering. Sensor Charasteristics. https://www.opto-e.com/basics/sensor-characteristics

STAFF DEBUG INFO

Kenno ja kennotyypit

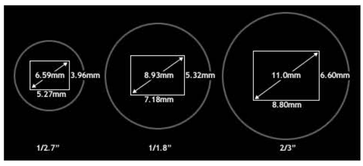
Bookmark this page

Kameran kenno siis koostuu valoherkistä elementeistä (pikseleistä), joihin muodostuu varaus valon osuessa niihin. Seuraava kuva esittelee matriisi- ja viivakameran kennoja.



Vasemmalla CCD-tyyppinen matriisi- ja viivakenno, oikealla vastaavat CMOS-tyyppisinä (kuvalähde: www.jai.com).

Kennojen koko ilmaistaan tuumissa. Tyypillisiä matriisikameran kennojen kokoja ovat mm. 1/2", 1/1,8", 2/3" ja 1". Tuumakoko ei kuitenkaan tarkalleen ottaen tarkoita mitään kennon fyysistä mittaa, vaan on siihen lähinnä verrannollinen. Mitoitus periytyy TV-kameroiden kuvaputkien ajalta ja tarkoittaa suurin piirtein sitä, että kenno mahtuisi kaikkine oheiselektroniikkoineen kuvaputken sisälle. Laskukaava on suurin piirtein seuraava: 1,5 x kennon lävistäjä pyöristettynä lähimpään murtolukuun. Seuraava kuva havainnollistaa kennojen mitoitusta käyttämällä hyödyksi ympyröitä, joiden halkaisija on kennon kooksi ilmoitettu tuumaluku.



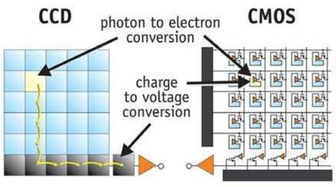
Havainnekuva kennojen koosta (kuvalähde: https://www.dpreview.com/articles/8095816568/sensorsizes).

Kennon oikea koko millimetreinä ilmoitetaan toki kameran datalehdessä. Tuumakoon merkitys on lähinnä se, että kameran kanssa yhteensopivat objektiivit määritellään myös vastaavien tuumakokojen avulla. Objektiivin datalehdessä saattaa siis lukea, että se käy kennokoille 2/3":aan saakka. Yleensä kennosta ilmoitetaan kameran datalehdessä ainakin seuraavat arvot:

- Kennon tyyppi (CCD vai CMOS)
- Sulkimen tyyppi (rullaava vai globaali, näistä seuraavassa osiossa lisää)
- Pikselien fyysinen koko (esim. 3,45 µm x 3,45 µm)
- Kennon fyysinen koko (esim. 6.6 mm x 4.1 mm)
- Resoluutio (esim. 1920 pix x 1200 pix)
- Kuvausnopeus (esim. 51 fps)
- Signaali-kohinasuhde (esim. 40,2 dB)

Kennotyypit

Kameroissa käytettäviä kennoja on kahta tyyppiä: CCD-kennoja ja CMOS-kennoja. Kennojen toiminta eroaa siinä, miten varauksen analoginen tieto muutetaan digitaaliseksi. CCD-kennossa (Charge-Coupled Device) pikselien varaukset siirretään yksitellen kennon ulostuloon, jossa suoritetaan A/D-muunnos. CMOS-kennossa (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sen sijaan muunnos tapahtuu suoraa pikselielementissä, jolloin ei tarvita erillistä piiriä A/D-muunnokselle. Seuraava kuva havainnollistaa CCD- ja CMOS-kennojen toimintaperiaatteen eroa. Sitä seuraava taulukko esittelee kennotyyppien edut ja haitat.



CCD- ja CMOS-kennon toimintaperiaate (kuvalähde: https://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html)

	CCD-kennot	CMOS-kennot
Edut	• Suurempi herkkyys • Pienempi häiriöherkkyys • Vähemmän viallisia pikseleitä yksinkertaisemman rakenteen ansiosta • Parempi kuvan homogeenisuus keskitetyn A/D-muuntimen ansiosta	• Merkittävästi pienempi energiankulutus • Pienempi kameran koko • Erittäin korkeat kuvataajuudet verrattuna samankokoiseen CCD-kennoon • Yksittäisten pikselien suoran osoitteen ansiosta mahdollisuus skannata vain osa kennosta • Suurempi herkkyys lähi-infrapuna-alueella (NIR)
Haitat	• Hitaampi lukunopeus • Ei pääsyä pikselitasolle • Monimutkaisempi rakenne → suuremmat ja kalliimmat kamerat • Suurempi energiankulutus	• Tuotantotoleransseista johtuvat suuremmat pikselien herkkyyserot • Alhaisempi herkkyys

Uusimmat CMOS-kennot ovat kuitenkin pääsemässä suorituskyvyssä jo samalle tasolle CCD-kennojen kanssa. Lisäksi CMOS-kennoja käytetään laajasti erilaisissa kuluttajatuotteissa, esim. kaikkien älypuhelinten kameroissa. Se tekee niistä edullisen vaihtoehdon myös teollisuuskäyttöön.

Lähteet:

Hornberg, A. 2017. Handbook of machine and computer vision: The guide for developers and users. Weinheim: Wiley-VCH. s. 319–320, 328, 336–337.

Vision Doctor. 2020. Camera. https://www.vision-doctor.com/en/camera.html

Stemmer Imaging. Sensor Types. https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/sensor-types/

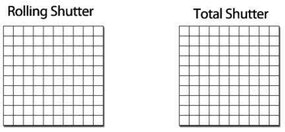
Suljin ja suljintyypit

Bookmark this page

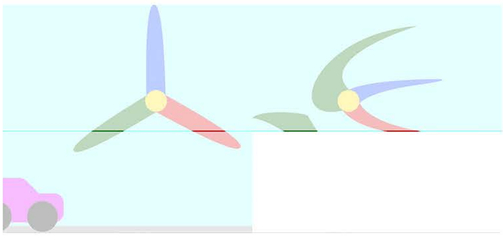
Suljin (engl. shutter) säätelee valon pääsyä kameran kennolle. Suljin on siis normaalisti kiinni, ja se aukeaa kuvaa otettaessa valotusajan mittaiseksi ajaksi. Perinteisesti kameroiden sulkimet ovat mekaanisia sulkimia. Niiden aukeamisesta ja kiinnimenosta johtuu esim. järjestelmäkameralla kuvattessa lähtevä naksahtava ääni. Alla oleva video näyttää mekaanisen sulkimen toiminnan.

Suurnopeuskameralla taltioitu kuvasarja mekaanisen sulkimen toiminnasta (kuvalähde: gfycat.com).

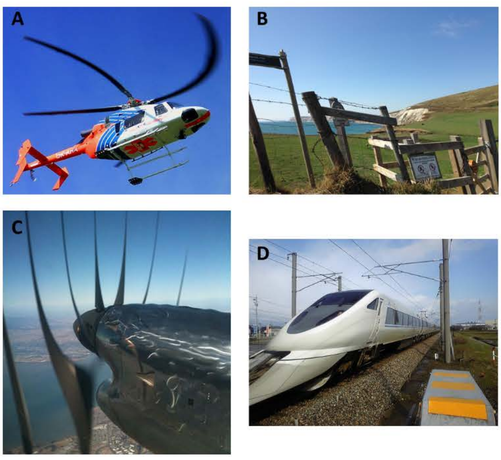
Konenäkökameroissa ja älypuhelinten kameroissa käytetään mekaanisten suljinten sijaan elektronisia sulkimia. Kennon pikselit siis vain aktivoituvat kuvanoton ajaksi eikä lisäksi tarvita mitään fyysistä laitetta. Suljin on siis elimellinen osa kennoa, ja siksi suljintyyppi ilmoitetaan kennon datalehdessä kuten edellisessä osiossa kerrottiin. Sulkimia on kahta tyyppiä: globaaleita sulkimia (global/total shutter) ja rullaavia sulkimia (rolling shutter). Globaalin sulkimen tapauksessa kaikki pikselit aktivoituvat yhtä aikaa kuvaa otettaessa eli sulkimen ollessa auki valo pääsee kaikille kennon pikseleille samaan aikaan. Rullaavan sulkimen tapauksessa pikselit aktivoituvat rivi kerrallaan. Valo pääsee näin kohteesta kennon eri pikseliriveille eri aikaan. Tämä nopeuttaa kuvanottoa, kun edellisten rivien/sarakkeiden informaatiota voidaan jo käsitellä seuraavan rivin/sarakkeen valotuksen aikana, mutta aiheuttaa vääristymää liikkuvaa kohdetta kuvatessa. Kun kuvadataa siirretään kennolta rivi kerrallaan sen sijaan, että siirrettäisiin kaikilta pikseleiltä yhtä aikaa, helpottaa se myös tiedonsiirtoa. Rullaavat sulkimet ovat standardiratkaisu CMOS-kennoissa, vaikka myös globaaliilla sulkimella varustettuja CMOS-kennoja on. CCD-kennoissa on aina globaali suljin, sillä niiltä ei voida lukea informaatiota vain rivi kerrallaan. Seuraava animaatio havainnollistaa suljinten erilaista toimintaa. Sitä seuraava animaatio ja kuvat havainnollistavat väärisytmiä, joita voi aiheutua rullaavan sulkimen käytöstä nopeasti liikkuvien kohteiden kuvaamiseen.



Havainnollistava animaatio suljinten toiminnasta rullaava suljin vs. globaali suljin (kuvalähde: www.slrlounge.com).



Havainneanimaatio rullaavan sulkimen tuottamasta vääristymästä liikkuvia kohteita kuvatessa (kuvalähde: Wikipedia Commons).



Rullaavan sulkimen aiheuttamia vääristymiä oikeissa liikkuvissa kohteista otetuissa kuvissa (kuvalähde: https://www.photometrics.com).

Yllä olevia kuvia katsoessa ihmettelee helposti, miksi edes käyttää rullaavaa suljinta. Pitää muistaa, että paikallaan olevien tai hitaasti liikkuvien kohteiden kanssa vääristymää ei tule. Lisäksi valoisissa olosuhteissa kuvatessa valotusaika on kuitenkin yleensä hyvin lyhyt (esim. 1/30 s), joten aikaero kuvan ylä- ja alarivin kuvaamisen välillä on myös lyhyt. Kuluttajakameroissa rullaavat sulkimet ovatkin hyvin yleisiä, ja moni kuluttaja on varsin tyytyväinen älypuhelimensa ottamiin kuviin rullaavasta sulkimesta huolimatta. Seuraava taulukko vertailee rullaavaa ja globaalia suljinta toisiinsa.

	Globaali suljin	**Rullaava suljin**
Kuvausnopeus	Hitaampi	Nopeampi
Vääristymä	Ei	Mahdollisesti
Kohina	Pieni	Hyvin pieni

Kuten todettua, rullaavaa suljinta käytetään yhdessä CMOS-kennon kanssa, ja se mahdollistaa hyvin korkean kuvausnopeuden hyvin pienellä kohinalla. Kohina pienenee, kun vain pieni osa kennoa on aktiivinen kerrallaan. Rullaava suljin on paljon halvempi valmistaa kuin globaali suljin. Sen takia suurin osa kuluttajakameroista, ja kaikki älypuhelinten kamerat käyttävät rullaavaa suljinta (ja CMOS-kennoa, joka on myös CCD-kennoa halvempi). Yleensä konenäkötarkastuksissa käytetään globaalia suljinta, mutta jos tarkastettava kappale pysähtyy aina tarkastuksen ajaksi, voidaan käyttää rullaavaa suljinta ja säästää merkittävästi kameran hinnassa.

Lähteet:

Basler. CMOS Rolling Shutter Cameras. https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/cmos-rolling-shutter-cameras/

Li, M., Kim, B. & Mourikis, A. (2013). Real-time motion tracking on a cellphone using inertial sensing and a rolling-shutter camera. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 4712-4719. 10.1109/ICRA.2013.6631248.

Mosaic. Rolling vs Global Shutter. https://www.mosaic51.com/technology/rolling-vs-global-shutter-camera-effects-explained/

Photometrics. Rolling vs. Global Shutter. https://www.photometrics.com/learn/white-papers/rolling-vs-global-shutter

Valaistuksen valinta

Bookmark this page

Erilaisia valaistuksen suuntia kannattaa kokeilla alkuun vaikka taskulampulla. Siitä saa jo hyvää käsitystä eri geometrioiden soveltuvuudesta. Valaistukselle on lisäksi optisia, sähköisiä ja mekaanisia vaatimuksia, joita kannattaa miettiä valintaprosessin aikana.

Optiset vaatimukset:

- Oikea aallonpituus
- Riittävä kirkkaus
- Riittävä tasaisuus
- Tarvitaanko pulssitusta?

Sähköiset vaatimukset

- Turvallinen käyttöjännite
- Onko tarvetta erilliselle ohjauselektroniikalle ja mitkä ovat sen liitännät
- Mahdollinen jäähdytyksen tarve
- Kaapeleiden pituus ja vahvuus

Mekaaniset vaatimukset

- Teollisuusstandardit täyttävä kotelointi
- Riittävä määrä kiinnityspisteitä
- Suojaus tärinältä
- Suojaus roiskeilta ja pölyltä

Lähteet:

Jahr, I. (2017). Lightning in machine vision. Teoksessa: Hornber, A. (toim.), *Handbook of machine vision* (s. 63 - 178, 2. painos). Weinheim: Wiley-VCH.

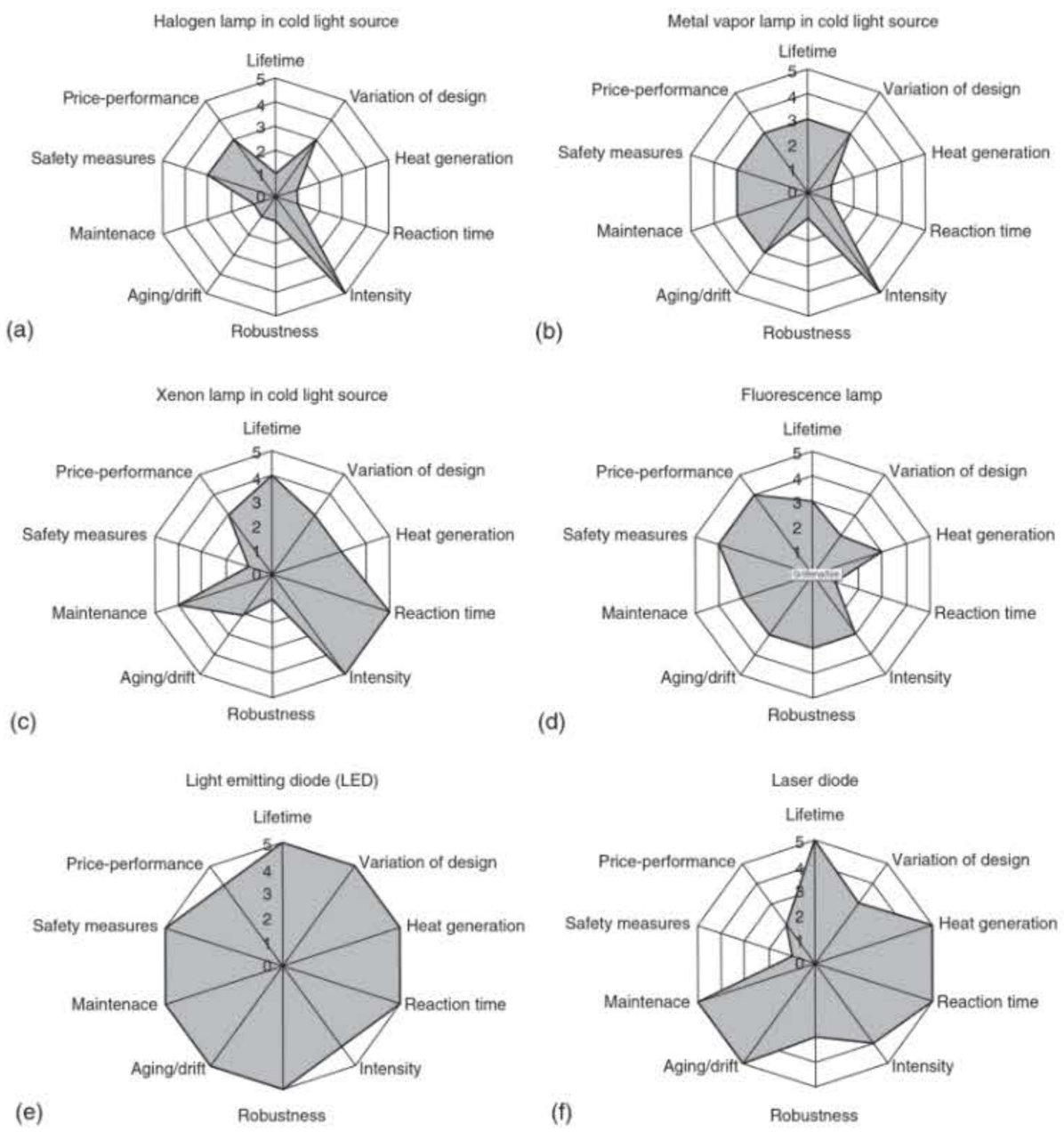
STAFF DEBUG INFO

Valaisintyypit

Bookmark this page

Valonlähteenä konenäössä voidaan käyttää ledejä, loisteputkia, halogeenilamppuja ja joissain erityissovelluksissa xenon-valoja ja laseria. **Ledit ovat konenäön standardivalaisintyyppi**. Halogeenilamppuja voidaan joskus käyttää niiden korkean valotehon ja hyvän väritoiston takia. Ongelmana kuitenkin on korkea lämmöntuotto, hidas syttyminen ja sammuminen (ei voi käyttää salamana) ja herkkyys tärinälle. Ne eivät siis täytä teollisuusstandardeja. Loisteputkilla taas saadaan valaistua laaja alue, ja ne ovat hyvin halpoja. Valoteho ei tosin ole kaksinen, ja loisteputkien valo välkkyy aina jollain taajuudella. Tavallisten loisteputkien taajuus on 50 Hz, ja se näkyy kuvassa selkeänä kirkkausvaihteluna. Vaaditaan siis vähintään korkeataajuuksisia loisteputkia. Loisteputkia ei myöskään voi käyttää salamavalona niiden hitauden takia.

Xenon- ja laservaloa käytetään suurnopeuskuvaussovelluksissa, joissa tarvitaan lyhyitä hyvin korkean intensiteetin valopulsseja. Esim. paperirainaa kuvaavat suurnopeuskamerat käyttävät usein laservaloa. Alla oleva kuvaaja esittelee valaisintyyppien vertailun. Kuten nähdään, ledit pärjäävät erinomaisesti kaikilla osa-alueilla. Ainoastaan suurempaa kirkkautta tarvittaessa (tai loisteputkien tapauksessa säästösyistä) kannattaa harkita jotain muuta valonlähdettä (tässä vertailussa lasereista on mukana vain led-laser).



Valaisintyyppien vertailua. Koska pelkän hinnan sijaan vertaillaan hinta-suorituskykysuhdetta, loisteputki ei erotu joukosta. Se on kuitenkin kaikista halvin vaihtoehto (kuvalähde: Jahr, 2017).

Lähteet:

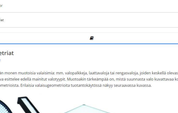
Jahr, I. (2017). Lightning in machine vision. Teoksessa: Hornber, A. (toim.), *Handbook of machine vision* (s. 63 - 178, 2. painos). Weinheim: Wiley-VCH.

STAFF DEBUG INFO

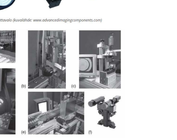
Valaisugeometriat

Bookmark this page

Konenäössä käytetään monen muotoisia valaisimia: rinn. valopuskiloita, laatuvaloja tai rengasvaloja, joiden keskellä olevasta reiästä kamera katsoo. Alla oleva kuva esittelee edellä mainitut valotyypit. Muotoilun tarkoituksena on, mitä suurempi osa kuvattavaa kohdetta valaisee. Tällöin puhutaan valaisugeometriasta. Erilaisia valaisugeometriaa tuotantokäytössä näkyy seuraavassa kuvassa.



Renges., pukkar. ja laatuvalo (kuvalähde: www.advancedimagingcomponents.com)



Erilaisia valaisugeometriaa tuotantokäytössä (kuvalähde: Jahr, 2017).

Kirkaskenttävalaisu

Jos valo suunnataan kohteeseen suoraan (ei mellein suoran yhdistäjän kameran suunnasta, puhutaan kirkaskenttävalaisusta. Jos valo taas suunnataan kohteeseen jyrkemmästä kulmasta kohteen sivulta, puhutaan pimeäkenttävalaisusta. Alla oleva kuva havainnollistaa kirkan ja pimeäkenttävalaisun eroa.

Valon suunnan vaikutus siihen, puhutaanko kirkas- vai pimeäkenttävalaisusta (kuvalähde: Wirk-Huber ym., 2015).

Kirkaskenttävalaisuksipia ovat suora kohdevalaisu, akiosaliivien valaisu ja bipolaatti. Ne kykylain tässä lyö omissa kappaleissaan.

Suora kohdevalo

Suorassa kohdevalaisussa kohdetta valaistaan suoraan ja ne mellein suoraan yhdistäjän. Suora kohdevalo on yksinkertaisin valaisuvaihtoehto ja siä voisi tavallisimmaksi valaisutavaksi. Tämä valaisutapa vaipi heijastamattomiin kohteisiin, jo ne ei pystykyan syntyä vaijoa. Alla havainnollaisa suoraata kohdevalaisusta rengasvalolla.

Mahdollise suora kohdevalaisu rengasvalolla. Vasemmalla perisiem jo sikeedlo tulokaus (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

Akiosaliivien valaisu

Akiosaliivissa valaisuun hyödynnetään diffuusoria ja puolipläisiesiä peitä, ja siinä valo tulee kohteelle suoraan kameran suunnasta. Puolläpäisiesi peä on 45 asteen kulmassa, valo tulee peästä suoraan diffuusorin läpi siculta ja ohjautuu siitä kohteeseen suoraan alaspäin. Valimessa käytetään usei tämä ratkaisu ja ohjelmoidaan peätin ja tulee siri läpi kameraan. Tällä valaisutekniikalla saadaan hyvin tasainen valaisu kohteelle. Se sopii hyvin laatuvälä ja linjaisuilla kohteilla. Pinnan epätasaisuudet eivät jouri esiin kuvassa. Alla olevaa kuvat esittelevat akiosaliivien valaisun periaatteen ja esimerkkikuvan.

Akiosaliivien valaisun periaate (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

Laadun vaikutusna suoralla kohdevalolla (osaa) ja akiosaliivillä valaisuksella (oikea). Näytön kejastuksen ja naarmut eivät näy akiosaliivilla valaistaessa otetusa kuvassa (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

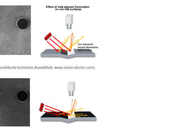
Kupolivalo

Kupolivalaisu yäki tulee mahdollisimman monesta suunnasta kohteeseen. Kupolissa on reikä, jossa kamera kohdetta katsoo. Kupolivalo minimoi heijastukset ja varjot siitä häiritsijä pinnanarkkuudesta ja epätasaisuudesta kuten naarmut. Kohteessa olevat pinnat eli ulkoreuna eli ulkoreunan vaikutusvat tarkentaa. Yksi ehtimisnaysa kupolivalaisuksia ovat ra- tunnetuksiaisina, joka sopii hyvin heitinsäteiden kappaleiden kuvaamiseen. Alla olevat kuvat esittelevat kupolivalaisuksia ja tunnetuksiaisina saka niiden vaikutusta kohteesta saatavaan kuvaan.

Kupolivalaisuksian periaate. Kupolin sisäpinta on heijastava, ja tie vaikeistilä tärkeä kupolin ala-auksen sisäreunan. Näin voi heijastua kupolin sisäpinnasta kohteelle mahdollisimman monesta suunnasta (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

Akiosaliivillisesa pudkihinkkuukaus kupolivalaisu ja sen vaikutusnasta kohteeseen (kuvalähde: Leino, Korteläinen & Valo (2014).

Sama kappale vaikutusta suoralla kohdevalolla (osaa) ja kupolivalolla (oikea). Pinnan epätasaisuudet ja naarmut eivät juuri näy akiosaisa kuvassa (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

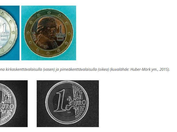


Tunneliuvalu soveltuu ärsiinsäisiien kappaleiden kuvaamiseen (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

Pimeäkenttävalaisu

Pimeäkenttävalaisussa kohdetta valaistaan jyrkässä kulmassa. Tällä menetelmällä saadaan korostettua pinnan epätasaisuuksia, sillä valo heijastuu niistä kameraan, mutta tasaisilta alueilta se jatkaa matkaansa. Menetelmiä voidaan rinn. naarmujen ja muiden pintavirheiden sekä pölyn etsintään pinnoilta. Ta, kuinka selkeästi pinnan korkeusero korostuisi, riippuu valaisun jyrkkydestä kulon alla olevat kuvat auttavat hahmottamaan.

Pimeäkenttävalaisu tasaiskeisia kulmasta (kuvalähde: www.vision-doctor.com).



Pimeäkenttävalaisu jyrkässä kulmasta (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

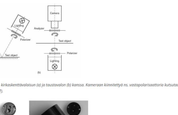
Kappaleen pimeäkenttävalaisu: ringsosiisilla. Korkeusero korostuvat (kuvalähde: Leino, Korteläinen & Valo, 2014).

Euron kolikkia valaistuna kirkaskenttävalaisulla (osaan) ja pimeäkenttävalaisulla (oikea) (kuvalähde: Huber-Mörk ym., 2015).

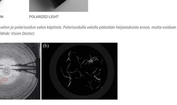
Euron kolikkia valaistuna pimeäkenttävalaisulla kiinnitä (osaan) ja jyrkässä (oikea) kulmasta (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

Taustavalo

Taustavalaisuksia kohdetta valaistaan sen takaa, ja siitä saadaan kirkkeesta muodostettua selkä-siluetti. Menetelmällä kohteen ärsiivat ja reiät saadaan hyvin esiin, ja se sopiikin etäsäyksiien ja pinta-alojen mittaamiseen kappaleista. Mitään informaatiota kohteen pinnasta ei luonnollisesti saada.



Taustavalon periaate (kuvalähde: www.vision-doctor.com)



Rusaaja, puitteja, mutteretta ja alusloogii esitäinnä taustavalolla. Suurimmissa puitteissa ja uusssa rusaaja siulla eläjeeä heijastaisi vaaitaan poisterrua, jos valaisu ja kappaleiden eläin saadaan niin. Kappaleet voivat siä siilä läpeäkäyvällä alustalla, jäka on hieman ärsiilaan läsnäolaisiaa.

Diffuusori ja polarisaattori

Valaisugeometriat-lisäksi valaisiksiaan voidaan vaikutusa lisäämällä valaisimeen diffuusori tai polarisaattori. Diffuusori pehmentää valaisnuista ja vähentää pistyksiäkiinen aiiitsuusuita kohteen pinnasuia ilulen aiisaaiiem valaisun ja kapiloulun taipaaksiaisiaa. Polarisaattori taas poistua heijastunna kappaleista. Polarisaatoista käytetaan tarvisan polarisaattori siää valoläläteeseen eitä epäläkaan. Polarisaatorisa voidaan myös käyttää tausvaalin kanssa, kun valaisnan läpikulusta kohteta kuten kuriuja. Alla olevista kuvista ensimmäinen esittelee pertaakiksian polarisaattorin käytöstä valon ja kamran kanssa, toinen polarisaattorin vaikutuksen heijastuksien poistosn ja kolmas kuriuja valaistuna polarisoivalla taustavalolla (uuna-kuva näkmin osossa Pierce valeisa).

Polarisaattorin käytö kirkaskenttävalaisun (a) ja taustavalon (b) kanssa. Kamerasn kimeistjetyä ns. valopolarisaattorin Autustaan ainejäsaattorilla (kuvalähde: Jahr, 2017).

DIFFUSE ILLUMINATION POLARIZED LIGHT

*Vertaile diffäänsiäsian valoa ja polarisaisiaan valoa käytöstä. Polarisaisiäälä valoälä pöistetän heijastuksiste eroon, mutta vaaitaan mennettä osa lälälälä

Valaistuksen merkitys

Bookmark this page

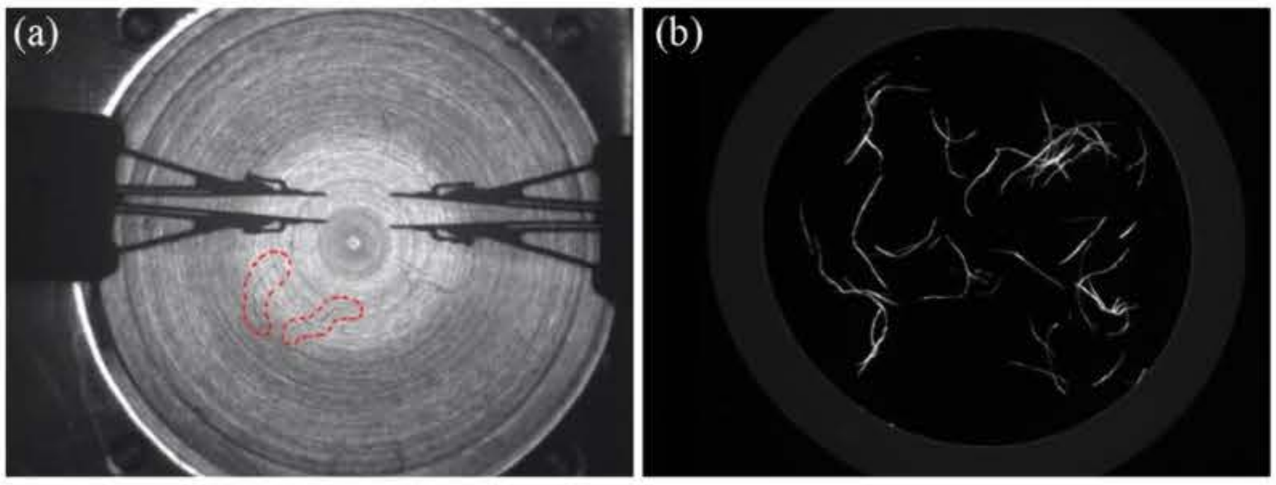
Valaisu on äärimmäisen tärkeä osa konenäköä. Huono valaisu tuottaa huonon kuvan, ja vaikka valaisusta syntyviä virheitä voidaankin tiettyyn rajaan asti kuvankäsittelyllä kompensoida, ei valaistuksen takia menetettyä informaatiota voi saada takaisin. Lisäksi valaistuksen korjaaminen kuvankäsittelyllä vaatii aina aikaa, ja se hidastaa konenäkötarkastuksen toimintaa.

Valaistuksella on konenäössä kaksi keskeistä tavoitetta:

1. Varmistaa, että ympäristöstä tuleva valo ja sen vaihtelu eivät vaikuta konenäkösovelluksen toimintaa
2. Korostaa tutkittavan piirteen tai etsittävän vian kontrastieroa taustaansa nähden, jolloin sen ohjelmallinen analyysi on mahdollistuu.

Tähän päästään käyttämällä kuvattavaan kohteeseen sopivinta suuntaa sekä aallonpituutta. Alla olevat kuvat havainnollistavat valaistuksen merkitystä. Ensimmäisessä kuvaamisessa on käytetty erilaisia valon aallonpituuksia ja jälkimmäisessä valon suuntaa.

Omena erilaisilla valoilla kuvattuna. Keskimmäisessä se näyttää ehkä houkuttelevimmalta, mutta oikeanpuoleisessa siinä oleva vika näkyy selkeimmin (kuvalähde: Basler).



Yksittäisiä paperikuituja kuvattuna ylhäältä tulevalla valolla (a) sekä alhaalta tulevalla polarisoidulla valolla (b). Yksittäiset kuidut on paljon helpompi erottaa kuvasta b.

Loppukaneettina voidaan sanoa, että valaistuksen optimointi vähentään kuvan esikäsittelyä, jolloin konenäköanalyysin suoritusnopeus paranee ja tehokkaampi järjestelmä toimii myös kustannustehokkaammin. Lisäksi onnistunut valaistus parantaa analyysin luotettavuutta ja laatua.

Lähteet:

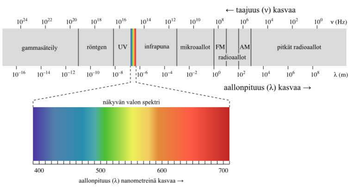
Stemmer Imaging. Ei päiväystä. Illumination. Saatavana: https://www.stemmer-imaging.com/en-fi/knowledge-base/illumination/

STAFF DEBUG INFO

Yleistä valosta

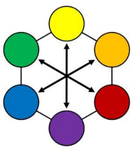
Bookmark this page

Valo on sähkömagneettista säteilyä. Kuten edellisessä osiossa mainittua valon aallonpituus (näkyvän valon tapauksessa väri), ja kohteelle tulevan valon suunta vaikuttavat suuresti kohteesta saatavaan kuvaan. Kohde saa värinsä sen mukaan, minkä väristä valoa se heijastaa ja minkä väristä se absorboi. Esimerkiksi jos kohde heijastaa vihreää valoa ja absorboi muita aallonpituuksia, nähdään se vihreänä. Mitä enemmän valoa kohde absorboi, sitä enemmän se myös lämpiää. Näkyvän valon aallonpituusalue on n. 400 - 750 nm, ja näkyvä valo on vain pieni osa sähkömagneettisesta säteilystä kuten alla oleva kuva osoittaa.



Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalue ja näkyvän valon osuus (kuvalähde: www.peda.net).

Koska kohde saa värinsä sen mukaan, minkä väristä valoa se heijastaa, voidaan valon värillä korostaa tai häivyttää tietyn värisiä piirteitä kohteessa. Luonnollisesti samaa väriä käyttämällä piirre näkyy selvästi (koska se heijastaa paljon valoa) ja sen vastaväriä käyttämällä kohde saadaan piilotettua (koska se ei heijasta juuri ollenkaan valoa). Seuraavaa vastavärypyrää voi käyttää hyödyksi valon väriä suunnitellessa. Sitä seuraava kuva havainnollistaa saman kohteen valaisua eri värisillä valoilla.



Vastavärypyrä, jossa toisiaan vastakkaiset värit ovat vastavärejä. Kohde voidaan häivyttää kuvasta käyttämällä valaistuksessa sen vastaväriä.

DAYLIGHT
Colour image. Daylight shot for comparison

WHITE LED
Normal shades of gray. Bright colors appear bright, the dark colors are looking normally dark.

BLUE LED
Blue logo (top left) heavily lightened, all yellow, orange and red tones of the object become dark.

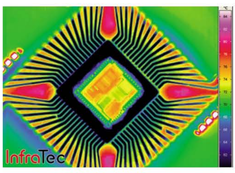
GREEN LED
Red areas around company logo "Granini" heavily darkened, "Fruchtgenuss" logo slightly lighter, yellow-orange mid gray.

RED LED
Red and orange areas almost white, blue and green logos appear very dark.

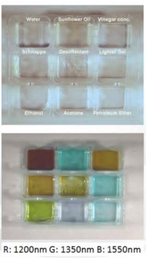
INFRARED LED
Except for green logo with a high proportion of black disappeared almost anything, even blue logo and expiration date

Sama kohde valaistuna eri värisillä valoilla ja kuvattuna harmaasävykameralla. Vasemmassa yläkulmassa verrokkina kohteesta päivänvalossa värikameralla otettu kuva (kuvalähde: Vision Doctor).

Näkyvää valoa seuraava lyhempien aallonpituuksien alue on ultravioletti (UV) ja näkyvää valoa seuraava pidempien aallonpituuksien alue on infrapuna (IR). Infrapunasäteilyn lyhyintä aluetta eli punaista aallonpituutta lähimpänä olevaa aluetta kutsutaan lähi-infrapunaksi (NIR). UV:lla ja infrapunalla saadaan eri asioita kohteesta paremmin esiin. Edellisessä kuvassa nähtiin jo yksi esimerkki infrapunavalon hyödyntämisestä kuvaamisessa. Yleisesti sitä käytetään erottamaan lämmönvaihtelu kohteessa, mutta sitä voidaan käyttää myös hyödyksi eri materiaalien erottelussa kuten seuraavat kuvat osoittavat.

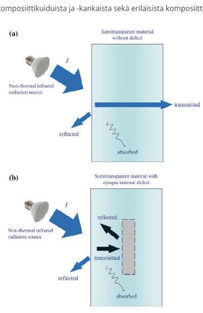


Lämpökamerakuva prosessorista (kuvalähde: www.infratec.eu).



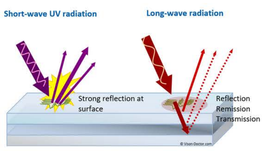
Näkyvän valon alueella kirkkaina näkyvät nesteet saadaan eroteltua toisistaan käyttämällä lähi-infrapunavaloa ja muodostamalla väärävärikuva (kuvalähde: Basler).

Infrapunavaloa voidaan hyödyntää myös vikojen etsimisessä läpikuultavissa kohteissa. Tässä hyödynnetään sitä, että vika muuttaa materiaalin ominaisuuksia ja näin myös infrapunavalon kulku kohteessa muuttuu: esimerkiksi suurempi osa siitä heijastuu takaisin viallisesta kohteesta kuin kunnossa olevasta. Tätä havainnollistetaan alla olevassa kuvassa. Infrapunaa on hyödynnetty virheiden etsinnässä mm. tekstiili- ja komposiittikuiduista ja -kankaista sekä erilaisista komposiittimateriaaleista.



Havainnekuva infrapunavalon hyödyntämisestä virheiden etsinnässä läpikuultavista kohteista (kuvalähde: Ibarra-Castanedo, Sfarra, Genest & Maldague, 2015).

UV-säteilyä puolestaan voidaan hyödyntää tutkittaessa mm. pinnan epätasaisuuksia, esim. naarmuja lasissa. Lyhyen aallonpituutensa ansiosta UV-säteilyj heijastuu herkästi pinnasta, jossa on pieniäkin epätasaisuuksia. Alla oleva kuva havainnollistaa tätä. Ultravioletttivaloa voidaan myös hyödyntää piilaantuneiden hedelmien tunnistuksessa, sillä piilaantuminen muuttaa UV-valon kulkua aineessa.



Havainnekuva UV-valon käytöstä pintavirheiden tutkimisessa. Pitemmät aallonpituudet kuten näkyvä valo menevät menevät osittain kohteen läpi sen pintavioista huolimatta. UV:sta suurin osa heijastuu takaisin (kuvalähde: www.vision-doctor.com).

Lähteet:

Ibarra-Castanedo, C., Sfarra, S., Genest, M. & Maldague, X. (2015). Infrared Vision: Visual Inspection Beyond the Visible Spectrum. Teoksessa Z. Liu, & H. Ukida, P. Ramuhalli & K. Niel (toim.), *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection* (s. 41–58). Springer.

Liu, Z., Ukida, H., Niel, K. & Ramuhalli, P. (2015). Industrial Inspection with Open Eyes: Advance with Machine Vision Technology. Teoksessa Z. Liu, & H. Ukida, P. Ramuhalli & K. Niel (toim.), *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection* (s. 1–37). Springer.

Vision Doctor. Ei päiväystä. Illumination. https://www.vision-doctor.com/en/coloured-light-coloured-objects.html