

Visió per computador aplicada al control de qualitat en la indústria metal·lúrgica

Daniel Roura Suarez

Resum– El projecte aplica tècniques de Visió per computador al control de qualitat en la indústria metal·lúrgica, concretament en el procés de tall i plegat. En la part d'inspecció de peces tallades es prendrà com a referència un fitxer vectorial, s'interpretarà i es compararà amb imatges de peces obtingudes després del tall. Mitjançant algorismes de segmentació, *pattern matching*, *blob detection* i descriptors de característiques s'han d'adquirir les dades necessàries per a saber si la peça real s'assembla a la vectorial. Per altra banda, la qualitat del plec es determinarà comparant l'angle final de la peça amb l'angle desitjat aplicant tècniques com RANSAC. Les toleràncies admissibles són les que estableix l'estàndard ISO 9013:2015 per al tall i l'ISO 2768:1898 per al plec. Es buscarà la major precisió possible i s'avaluarà a quina tolerància pot treballar el sistema.

Paraules clau– Control de qualitat, inspecció, visió per computador, metal·lúrgia, Intel·ligència Artificial.

Abstract–The project will try to apply computer vision techniques to quality control in the metal industry, specifically in the cutting and bending process. Inspection of cut pieces will be taken as a reference to a vector file, will be interpreted and compared to pieces of images obtained after the cut. Using thresholding algorithms, segmentation, pattern matching, blob detection and feature detection must acquire the necessary data to know if the real piece is similar to the vector. On the other hand, the quality of the fold will be determined by comparing the final angle of the piece with the desired angle applying techniques such as RANSAC. The tolerances admissible are those that establishes the ISO 9013: 2015 standard for cutting and the ISO 2768: 1898 for the fold. The greatest possible accuracy will be sought and the tolerance of the system will be evaluated.

Keywords– Quality control, inspection, Computer Vision, metal, artificial intelligence.

1 INTRODUCCIÓ

LA detecció de defectes en els processos de fabricació pot estalviar molts costos, ja que un error al final del procés pot ocasionar la pèrdua de molts recursos, per tant, permeten reduir el sobrecost associat a acabar un producte que finalment serà rebutjat. Aquest efecte pot anticipar-se si es detecta quan és comès. L'objecte d'aquest treball és el d'aplicar eines de *machine vision* per a inspeccionar defectes en la fabricació de peces al sector del metall, relacionats amb mesures, imperfeccions i cotes dins d'unes determinades toleràncies. La indústria de la inspecció automàtica ha crescut de manera inqüestionable les darreres dècades [1], i n'existeixen un ampli ventall

d'aplicacions al voltant del control de qualitat en multitud d'indústries. L'ús d'aquesta tecnologia es torna indispensable per a tenir competitivitat en la producció i qualitat. La indústria 3.0, en la que estem vivint una revolució actualment, es basa en sistemes automàtics i energies renovables, inclosos el *machine vision*, tendències que es fan indispensables en la següent revolució industrial que s'està gestant, la 4.0, on hi ha un èmfasi en la qualitat, productivitat, automatismes, *IoT* i energies renovables. Aquesta proposta de projecte encaixa amb aquesta filosofia i precisament aplica mètodes per a un increment de qualitat i productivitat, a tasques on precisament un humà no seria eficient ni viable. Són nombroses les aplicacions de la *machine vision* a la indústria metal·lúrgica, com ara el control de qualitat en la soldadura [2], en les peces mecanitzades en 3D [3] (torn i fresadora). Fins i tot existeixen solucions molt similars a la que intenta aconseguir aquest treball. De fet, aquestes solucions, no opten per fer servir lents telecèntriques, sinó que fan servir lents tradicionals, però per a suplir els seus desavantatges, prenen diferents mesures [4]. Es pot consi-

- E-mail de contacte: daniel.roura@e-campus.uab.cat
- Menció realitzada: Computació
- Treball tutoritzat per: Felipe Lumbreras (CVC)
- Curs 2018/2019

derar que l'objectiu d'aquest treball pretén prendre mesures on un ésser humà no pot prendre cotes de manera efectiva, degut a la complexitat que pot tenir una peça, fet que es pot suplir amb un algoritme.

2 OBJECTIUS

Els objectius es poden dividir en 2 grans subapartats, el de la detecció d'errors dimensionals en el tall i la inspecció del plec.

A l'hora de quantificar l'ambició del projecte, es prendrà com a referència què diuen els estàndards de la indústria. La *International Organization for Standardization* (ISO) formalitza unes pautes per a determinar si una peça amb tall tèrmic és apta i vàlida referent al seu estàndard. L'article de referència és ISO 9013:2017 [5], que fa referència a una diversitat de mètriques a tenir en compte durant l'avaluació de la qualitat del tall, entre elles, dimensions de la peça en qüestió, l'angle del tall, les dimensions de les imperfeccions inferiors, tolerància entre l'espessor de la peça... En aquest treball l'enfoc serà el de detectar els errors dimensionals.

Pel que fa a la qualitat en sistemes de plec, el estàndard que en fa referència és el ISO 2768-1:1989 [6], que determina quines són les toleràncies dimensionals de plec i angles assumibles.

2.1 Detectar errors dimensionals en el tall

Principalment, l'objectiu és la comparació de fotografies de les peces després de ser tallades a partir d'arxius vectorials. La tecnologia implementada per a tallar les peces pot ser làser, plasma o bé aigua a pressió, tot i que en aquest article s'analitzarà el tall amb làser.

Per a quantificar l'error de cada contorn d'una peça, s'ha de comparar amb la peça ideal, que serà un arxiu vectorial, el mateix que la màquina ha pres per a tallar-la. En aquest sentit, s'haurà de trobar un format vectorial (.dwg,.dxf...) que sigui viable de comparar amb la peça en la fotografia. La fotografia de la peça haurà de ser filtrada i tractada de manera que se'n puguin extreure característiques.

S'analitzaran les distorsions o imperfeccions que poden tenir les lents a l'hora de captar imatges (tangencial, de barril...) corregir-les amb filtres, és a dir, preprocessar-les per a poder efectuar les mesures, a més de mesurar errors en inclinacions de l'espai de treball. Per a interpretar les peces, s'aplicaran mètodes de *threshold* i segmentació, i s'aplicaran mètodes de *matching* per a determinar-ne l'orientació i posició a l'espai de treball.

Per últim, caldrà analitzar com interpretar els contorns amb precisió subpíxel, amb l'objectiu d'obtenir la màxima exactitud en possible en mesures. Les mètriques de mesurament emprades en aquest article són: l'error de posicionament de contorns de la peça i determinar quin és l'error en el *cutting kerf*, que és el gruix de tall que proporciona l'eina, element que s'ha de calibrar per a cada tipus de material.

2.2 Inspecció de plec en temps real

Un cop la peça ha sigut tallada, el següent procés és doblar-la. Els paràmetres a avaluar són l'angle de plec i l'*springback*. *Springback* és el fenomen que succeeix quan a un material deformable se li aplica una pressió i, degut a

la seva elasticitat, tendeix a recuperar part de la seva forma original [7]. Aquest fenomen és molt comú en el plec de peces. Cal obtenir una seqüència d'imatges mentre s'està formant el plec per tal d'elaborar una gràfica d'angles en funció del temps, i així treure l'*springback* i l'angle final resultant. Aquest procés ha d'oferir la major independència possible al operari, és a dir, que li ofereixi informació de manera que no hi hagi de realitzar cap acció.

3 ESTAT DE L'ART

Ja que l'objecte d'aquest article és el control de tall tèrmic i plec de xapa, s'han de cercar quines són les solucions que ja existeixen al mercat que contemplin aquests problemes, no només en *machine vision*. En referència al control de tall, existeixen solucions al mercat que funcionen amb lents telecèntriques, amb il·luminació frontal [8], un àrea on es dipositen les peces i són analitzades en dues dimensions. Altres aproximacions [9] manquen de lents telecèntriques, però utilitzen més sensors col·locats estratègicament per a reduir l'efecte de la perspectiva. També existeixen equips similars [10] que, a més de realitzar el control de qualitat, fins i tot són capaços de fer *reverse-engineering* de contorns per a exportar la peça a un arxiu vectorial, i tenen, a més, l'habilitat d'analitzar superfícies 3D de peces ja plegades amb llum estructurada i trobar-ne defectes. En referència al plegat, alguns fabricants utilitzen eines de mesurament amb làser, que controlen precisament l'*springback* i l'angle final de plec, un exemple és *Bystronic LAMS* [11]. Respecte a l'àmbit de *machine vision*, hi han 2 articles que intenten solucionar el mateix problema que aquest treball, un d'ells [12] utilitza la transformada de *Hough* per a trobar les línies de la imatge, però no intenta trobar l'*springback*, paràmetre important. El segon [13], és un document més antic que utilitza les eines més primitives de la visió per a mesurar l'angle, i tracta més del model matemàtic al voltant del plegat i *springback*.

4 METODOLOGIA

La metodologia seguida és el disseny en espiral. S'ha fet molt èmfasi en trobar l'element que aporta major risc o dificultat i proporcionar-li prioritats, per això, va ser escollit primer realitzar el control de qualitat en el tall, i finalment ha necessitat una major part dels recursos temporals del treball. Ha sigut necessari realitzar canvis dels objectius, analitzar el seu risc i fer proves del codi desenvolupat. S'ha utilitzat Git per a fer possible tenir un control de versions i treballar des de més d'un equip. També s'han hagut de dedicar importants recursos temporals en aprendre a utilitzar l'eina d'anàlisi i processament *Halcon*.

5 DESENVOLUPAMENT

En aquest apartat es detallaran les eines utilitzades tant en el control de les toleràncies en el tall com la detecció de l'angle de plec, així com el procés a seguir per a dur a terme el seu control de qualitat. Es proporcionaran els codis utilitzats en els 2 casos per tal de fer possible la rèplica d'aquests experiments.

5.1 Toleràncies en tall

Per a fer el control de les toleràncies dels contorns de les peces tallades, es situarà una càmera amb vista zenital fixa que capturi fotogrames de peces situades en un pla calibrat, que inicialment serà un *backlight*.

Per a processar les imatges de les peces tallades s'utilitzaran dues aproximacions: la primera amb python, fent servir la llibreria *OpenCV*, *scikit-learn* i d'altres eines del llenguatge. La segona aproximació es farà amb l'eina *Halcon*, un software de visió. La seqüència a dur a terme en les dues aproximacions és la mateixa, però s'utilitzaran les eines de cada entorn en cada cas (veure figura 1 amb els passos). El primer pas consisteix en calibrar l'entorn de treball per a poder realitzar mesures, en aquest pas s'aconseguirà una funció per a eliminar la distorsió de les imatges preses i es trobarà l'escala píxels/mm en la que es troba el pla de l'entorn de treball. A continuació es farà *matching* amb la peça de la imatge, que consisteix en buscar la transformació rígida (sense escalat) que millor defineixi la posició de la peça en el pla a inspeccionar. Finalment, es calibrarà l'entorn de treball i s'aplicarà metrologia als contorns.

5.1.1 Solució amb Python i OpenCV

Calibratge de l'entorn de treball El calibratge de l'entorn de treball és el procés de transformar el nostre espai de treball en una vista ortogonal, és a dir, que les mides es conservin en qualsevol interval de la imatge. Els processos a seguir són: calibratge de càmera, eliminació de distorsió radial, eliminació de distorsió perspectiva, obtenció d'escala píxels/mm i calibratge de contorns a precisió subpíxel a la figura 1 hi ha una representació gràfica dels passos del calibratge, junt amb les seves entrades i sortides. El primer procés a dur a terme és el de calibrar la càmera, la metodologia empleada amb *OpenCV* [14] és la descrita en un article de Zhang [15] i un model proposat per Bouguet [16] que consisteix en fer servir un patró d'escacs i realitzar al voltant d'una dotzena de fotografies en les que es col·locarà el patró d'escacs en posicions diferents. D'aquestes mostres se'n obtindran les interseccions en les caselles, que seran els punts coneguts en un pla 2D. D'aquest pas n'obtinguem la matriu de càmera i els coeficients de distorsió, amb els que serà possible eliminar la distorsió radial que, amb més o menys error, provoca qualsevol lent (valors negatius) o bé, la distorsió de coixí (valors positius). *OpenCV* ofereix una funció que transforma els coeficients de distorsió k_1, k_2, p_1, p_2, k_3 en una matriu de correcció de distorsió que anomenarem D . Després, cal compensar la perspectiva o els possibles defectes d'alineació de l'entorn de treball. Tant la càmera com la base on es posa el material poden estar posicionats amb errors, és per això que es compensarà aquest defecte amb una homografia. La metodologia per a obtenir aquesta matriu de transformació comença per fer servir una de les imatges del calibratge de càmera (patró d'escacs) que estigui posicionada plana a la superfície de treball. S'obtenen les quatre cantonades exteriors del patró amb l'operador Harris [17], i es computa una homografia de quatre punts prenent-los com a referència, sent el destí les coordenades d'un quadrat creat artificialment a partir del llarg d'un dels costats del patró d'escacs. La matriu d'homografia H és la sortida d'aquest procés. Convé ressaltar que la informació de distorsió radial i perspectiva és

necessària per realitzar el següent procés: el calibratge de *blobs* i l'obtenció d'escala. Per a aquest fi s'ha creat una nova platina de calibratge. Un cercle de 50mm de diàmetre i 16 forats situats al centre, de 5mm, on cada forat té 10 mil·límetres de separació, es pot observar a l'apèndix com a 10. Aquest patró pot contenir errors dimensionals, per això ha sigut examinat amb peu de rei, per a saber el valor exacte de les dimensions de la platina. Cal recordar que el nostre entorn de treball en un principi és el *backlight*, així que per naturalesa l'il·luminació pot erosionar contorns exteriors i interiors, de manera que els primers esdevindran més petits i els segons més grans, mentre que la distància entre forats no es veurà afectada. L'objectiu d'aquesta part del calibratge és trobar l'escala píxels/mm. Per a obtenir més precisió, es farà interpolació bilineal, eina que proporciona *OpenCV*, per trobar així quin és el valor que correspon a cada píxel en un gradient. L'escala píxels/mm sortirà a partir de les mitjanes de les distàncies entre cada centre de forats, relacionant-lo amb les mesures proporcionades amb el peu de rei. Ara caldrà trobar el valor *threshold* tal que les àrees de contorns interiors i exteriors s'aproximi al màxim a les distàncies observades entre els centres de forats. Per a fer això es començarà amb un mètode de *thresholding* que troba el valor que proporciona la màxima variància entre classes, utilitzant la tècnica d'Otsu [18]. A partir del valor de referència s'incrementarà o disminuirà el valor de *thresholding*, de manera que les àrees mesurades coincideixin amb la distància de l'escala observada. Després d'aquesta cadena d'accions, les seves sortides hauran de ser utilitzades cada vegada que s'inspeccioni una nova peça per a corregir l'entorn de treball, que seran els valors d'escala i *threshold* s, t. Veure figura 1.

Representació del model En la primera aproximació, la comparació es fa amb una màscara generada a partir del fitxer vectorial. Per a fer l'exportació, simplement amb un programa que interpreti arxius vectorials (*AutoCAD*, *DraftSight*, *Adobe Illustrator*) és possible exportar a format *BMP*, de manera que els píxels són valors que pertanyen a la peça, i els píxels a false són valors que pertanyen al fons. Preferiblement, s'exportarà a una resolució molt major a la imatge, de manera que es necessitin més píxels per mil·límetre que la tolerància màxima admissible. S'ha contemplat la utilització de llibreries externes amb *python* per a l'exportació automàtica de en format *bitmap*, com per exemple *ezdxf* [19], que esdevé del projecte *dxfgrabber*, ja discontinuat, però per a la primera aproximació és suficient amb els programes anteriorment esmentats.

Matching En el procés de *matching*, cal trobar una transformació rígida (rotació i translació) tal que la posició de la màscara *DXF* respecte a la peça sigui màxima. Aquesta similitud es pot mesurar amb diferents mètriques, més endavant es descriuran. Cada imatge analitzada haurà de ser rectificada amb les matrius de transformació de distorsió D i homografia H . Després, la imatge ha de ser escalada mitjançant interpolació, amb un valor s_1 , per a obtenir més precisió, depenent de la tolerància desitjada. El model *DXF* ha de ser escalat tenint en compte tant l'escala píxels/mm s obtinguda en el calibratge, com l'escala en la que la imatge ha sigut incrementada per interpolació, seguint la transfor-

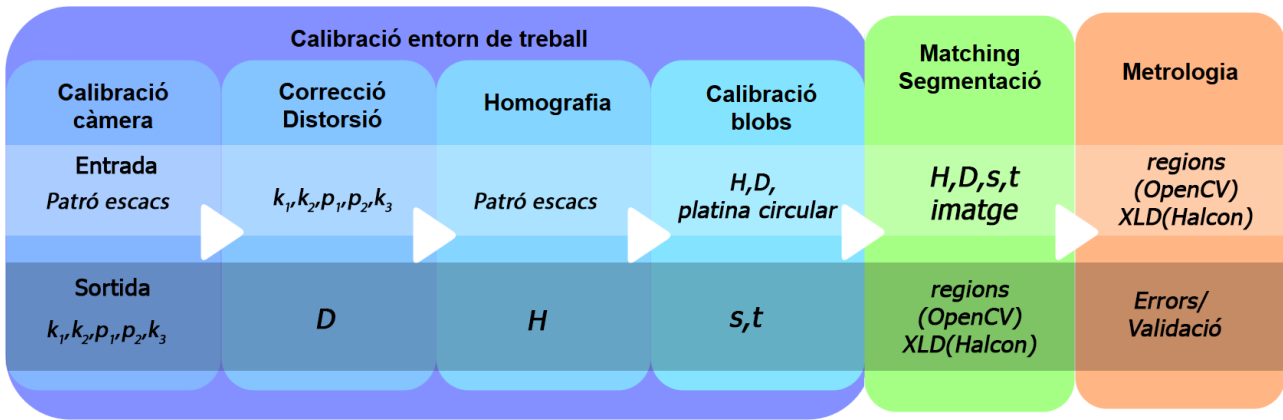


Fig. 1: Diagrama amb tots els passos per al control de peces tallades.

mació de l'equació 1.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 s / s_m & 0 \\ 0 & s_1 s / s_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (1)$$

On s_m és l'escala píxels/mm en l'exportació del model *DXF*. En aquest moment la peça i el model estan a les escales desitjades, el següent pas és aplicar el *threshold* amb el valor t obtingut al calibrar l'entorn de treball. Després s'han de trobar els centres de gravetat de la peça i el model, amb la fórmula 2, i s'aplicarà una translació al model $x = x' + \Delta x; y = y' + \Delta y$ on $\Delta x; \Delta y$ és la posició x, y de la peça a la imatge respecte al model. Això ens permetrà posicionar el model on es troba la peça.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i m_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^n y_i m_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (2)$$

On els valors \bar{x}, \bar{y} són els centres de gravetat de la peça i model. Ara falta trobar la rotació del model respecte la peça, per a tal fi, obtindrem els centres de gravetat de cada contorn, que seran aïllats mitjançant *labelling*. El *labelling* etiquetarà cada contorn amb màscares binàries, de manera que es podrà accedir a cadascun d'ells de manera independent i trobar els seus centres de gravetat amb la fórmula 2, utilitzada anteriorment amb els centres de les peces. D'aquesta manera s'obtindrà el resultat de la figura 2 en la qual es troben marcats en vermell els centres de gravetat dels contorns.

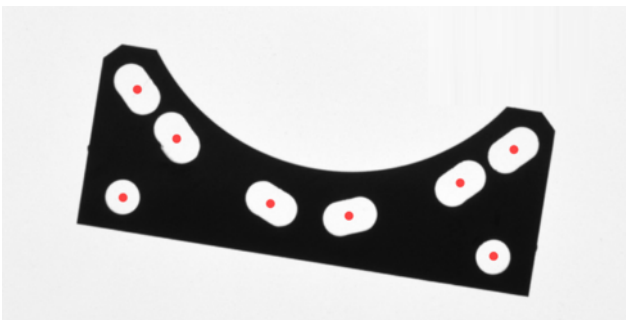


Fig. 2: Centres de gravetat dels contorns.

Un cop obtinguts els centres de gravetat tant de la peça com del model, caldrà realitzar rotacions discretes dels punts del model respecte el centre de gravetat de la peça

per a trobar la rotació tal que la funció de similitud sigui màxima. A cada rotació discreta, s'haurà de traslladar la peça al centre de coordenades i multiplicar per la matriu de rotació d'aquell angle. En el cas de la mètrica A és un procés de menor complexitat computacional, ja que només cal multiplicar els punts dels contorns per la matriu. Però en el cas B cal rotar la imatge sencera cada vegada. En principi, l'opció considerada com vàlida actualment és la A. L'operació geomètrica utilitzada per rotar els punts és la de la funció 3:

$$Rot(t_x, t_y)(\alpha) = Trans(t_x, t_y) Rot(\alpha) Trans(-t_x, -t_y) \quad (3)$$

Rot és la matriu de rotació, α és l'angle a rotar i t_x, t_y és el centre de gravetat de la peça a rotar. Si la peça no té simetries en cap eix, l'espai de cerca angular ha de ser de 0 a 360 graus. En el cas que la peça tingui alguna simetria, es pot restringir l'espai de cerca a 180, 120, 90 graus... O més, depenent del tipus de simetria de la peça.

S'utilitza una imatge a 3 canals (RGB) per a mostrar el *matching*, situant en capes diferents els models i la peça. Les dues mètriques per a decidir la màxima similitud són les següents:

Mètrica A Entrenar un *1-nearest-neighbour* per a cada centre de gravetat dels contorns de la peça. Es tracta de trobar la rotació discreta de tots els punts tal que minimitzi la següent funció 4:

$$\min \left(\sum_{i=0}^n \sqrt{(x_n - \hat{x}_n)^2 + (y_n - \hat{y}_n)^2} \right) \quad (4)$$

x_n, y_n és el centre de gravetat de la peça més proper al punt \hat{x}_n, \hat{y}_n resultant de la n -èsima rotació discreta n . En aquesta mètrica es treballa amb punts, que en cada iteració són trobats amb multiplicació de matrius de rotació d'un determinat angle discret.

Mètrica B Si la peça té la peculiaritat de no tenir contorns no serà viable fer servir la primera mètrica, en aquest cas es poden comparar els píxels del model amb els de la imatge que coincideixin, el resultat donarà un percentatge i és el que hem de maximitzar, mitjançant la mètrica $\max(A \cap B / A \cup B)$. On A i B són els píxels del model

i de la peça, respectivament. Alternativament, es treballarà amb imatges, no amb punts 2D.

Metrologia La metrologia amb *OpenCV* és similar a la d'*Halcon*, tot i així, les proves es faran amb aquesta última, ja que aporta molta més precisió i velocitat de processament. Els errors que es treballen són el mesurament de l'*offset* de tall, a la secció 5.1.2 i l'error de posicionament o carència de contorns a la secció 5.1.2, aquests errors s'explicaran amb més profunditat a l'apartat de metrologia d'*Halcon* 5.1.2.

5.1.2 Solució amb *Halcon*

Halcon és un entorn de desenvolupament de Visió per computador que ofereix un conjunt de llibreries basades en l'estat de l'art del sector. Recull una gran varietat d'exemples d'aplicacions de *machine vision* a la indústria, a més d'un ampli conjunt d'eines d'apartats com visió/mesurament 1D, 2D i 3D, segmentació, classificació, *matching*, a més d'un ampli repertori de documentació orientada a solucionar problemes relacionats. Permet exportar el codi d'*Halcon*, que consisteix en el seu conjunt de funcions, en C++, C#, Visual Basic o C, ja que la filosofia d'aquest software és proporcionar una ràpida implementació de solucions.

Calibratge de l'entorn de treball El mètode de calibratge de l'entorn de treball és equivalent al realitzat amb *OpenCV*, tot i que s'utilitzaran les funcions equivalents d'*Halcon*, exceptuant la matriu de càmera que s'utilitzarà la obtinguda anteriorment amb *OpenCV*, tot i que *Halcon* proporciona assistents per a calibrar-la. És també necessari consultar el full tècnic de la càmera per a saber la dimensió de píxel i incloure'l amb les dades necessàries. A la guia d'*halcon* especifica com corregir la distorsió radial [20]. Alhora de segmentar la peça es proporcionen tècniques de *thresholding* subpíxel [21], que utilitza tècniques d'interpolació bilineal [22].

Representació del model El model inicial és un fitxer del format *DXF* (*Drawing eXchange Format*), amb el que *Halcon* és compatible. *Halcon* per a descriure arcs i polígons fa servir el seu objecte *XLD* [17] (*Extended Line descriptor*) en el que incorpora moltes funcions. Tant l'arxiu vectorial com la imatge seran transformades a *XLD*, així serà possible obtenir precisió subpíxel, cal dir que si en algun moment es fa una transformació a la imatge no desitjada, el *XLD* del contorn de la imatge es pot transformar en regió, element que no té informació subpíxel.

Matching Caldrà segmentar quins són els píxels de la peça a analitzar, de manera que trobem la posició i orientació en la fotografia a inspeccionar.

Halcon té un seguit d'eines per al *matching* en dues dimensions, abans de decidir quines eines fer servir, caldrà analitzar quines són les característiques del nostre problema [23]. Per afrontar aquest problema, el tipus de *matching* que es farà servir és el *shape-based matching* de *Halcon* [24], que posa en correspondència la forma dels contorns. Com és comentat anteriorment, el model es crea a partir d'un arxiu vectorial *DXF*, aquest model serà entrenat de manera que ja es coneix exactament l'escala exacta en la que es pot

trobar l'objecte a la imatge, de manera que l'entrenament només consisteix a fer rotacions del model. El *matching* ens proporcionarà una transformació rígida des de l'origen de coordenades del model a l'element trobat a la imatge. *Halcon* també proporciona eines per a entrenar models amb deformació de perspectiva [25], que serien útils de no fer l'homografia, però el temps de *matching* seria molt més elevat, ja que el model ha de ser trobat en un rang de posicions i deformacions en perspectiva. A més, a l'aplicar l'homografia, el procés de trobar errors dimensionals es simplifica notablement. Es pot observar a l'apèndix d'imatges un exemple on es mostra el *matching* de contorns a la imatge 9.

El motiu de la necessitat de fer el *matching* amb l'escala exacta és perquè es projecta la peça al pla de treball exactament com hauria de ser, sense errors, i després es podrà trobar la correspondència de contorns i la comparació amb diverses mètriques d'errors.

Optimització del temps de cerca La primera optimització consisteix en acotar l'espai de rotacions, de manera similar a la que es realitza amb la solució de *python+OpenCV*, en el cas que la peça tingui simetries.

Després, un mètode que permet disminuir aproximadament 10 vegades el temps de cerca (segons proves realitzades) és el de trobar la polaritat del model [26]. Que és la informació que es té sobre el color (o intensitat) del model respecte al seu fons, veure figura 3. Un cop s'entrena el pri-

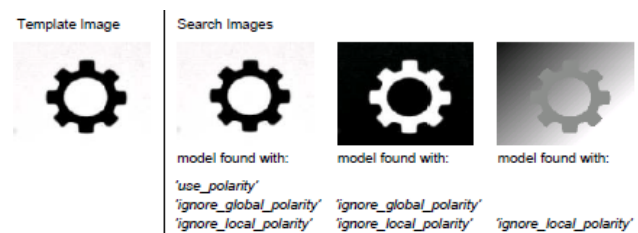


Fig. 3: Diferents polaritats

mer model (sense polaritat) es busca per primera vegada on es troba al *backlight*, de manera que, per convenció, la peça estarà sempre de color negre sobre un fons blanc. Aquestes dades les té en compte *Halcon* per a fer la cerca molt més ràpida, aquest valor de la polaritat l'hem de tornar a desar a l'arxiu del model exportat.

A les primeres proves de *shape-based matching* de *Halcon*, el temps de cerca era de gairebé un segon, al trobar la polaritat i l'escala exacta del model, el temps de cerca ha quedat reduït a desenes de mil·lisegons.

Segmentació de la peça Tot i que no és important si es fa abans o després del *matching*, l'objectiu és obtenir quines parts de la imatge formen part de la peça, però no és suficient amb trobar els píxels, sino que cal trobar la peça amb precisió subpíxel. *Halcon* proporciona eines per resoldre aquest problema [21] i [22]. L'operador utilitza interpolació bilineal, i és el mateix que va ser utilitzat per a segmentar la platina de calibratge, però en aquest cas es farà servir el valor de *threshold* de la sortida de calibratge de *blobs*. De la mateixa manera que amb el *matching* tenim la posició més aproximada possible de la peça a l'entorn de treball, i la representem amb els contorns *XLD*, també podem passar

el resultat del *threshold* subpíxel a contorn *XLD*, on podrem procedir a comparar resultats. Per a tenir més tolerància a errors, s'aplicaran eines per a tancar contorns que proporciona *Halcon*. El motiu pel qual es treballa amb contorns *XLD* i no regions és perquè aquestes últimes no proporcionen precisió subpíxel, tota la informació de segmentació subpíxel es pot trobar a [27].

Metrologia Un cop localitzada la peça i segmentada, es parteix de 2 subconjunts de contorns *XLD* amb precisió subpíxel un dels quals pertany a la peça real i l'altre al model *DXF*. Caldrà aplicar diverses tècniques d'inspecció per a trobar els tipus d'errors més habituals al problema. En un apartat posterior es mesuraran quantitativament els errors per veure si entren dins de l'estàndard ISO 9013:2017, però aquí es descriuran els errors i les tècniques per trobar-los. Cal dir que s'aplicaran tècniques de tractament de contorns especificades al manual de *Halcon* [28]. El primer pas és trobar quina és l'equivalència de cada un dels contorns de la peça amb el model, per a aquest fi es buscarà quin és el contorn més proper a cada un dels contorns del model, tenint en compte el seu centre de gravetat, amb la mateixa mètrica que l'aplicada amb *OpenCV* i l'equació 2. Si la peça té molts errors, com per exemple, contorns que no pertanyen al model, o bé contorns que no s'han aconseguit tallar, existirien contorns on el contorn més proper correspon a una posició molt allunyada, i seria automàtic trobar un error que pugui descartar la peça. Cada error, mesurat en píxels, serà transformat a mil·límetres mitjançant l'escala del model, obtinguda en el pas de calibratge de l'entorn de treball. Segons l'estàndard ISO, els errors de la peça assumibles poden ser més permissius depenent de la seva mida, així que es poden assignar diversos nivells o graus d'imperfeció depenent de les exigències de precisió de la peça o de l'estàndard a aplicar. La manera en què es mostren els errors per pantalla consisteix en mostrar els contorns correctament de color verd, els que tenen un error probable o lleu en taronja, i els que tenen clarament un error superior al admissible, en vermell, un exemple es pot veure a la imatge 12 de l'apèndix. Cal dir que cada tipus d'error es valorarà per separat, és a dir, pot ser que un contorn tingui la mida desitjada però no estigui en una posició correcta, aleshores el tipus d'error serà posicional i no dimensional.

Errors de desplaçament als contorns Un error típic és que una peça s'aixequi degut a l'extrema pressió d'aire que expulsa el capçal de tall, en aquest cas, és possible que la xapa en procés es mogui unes dècimes de mil·límetre respecte a la seva posició inicial, detectar aquests petits errors pot ser important. Ja que es coneix la correspondència de contorns, cal veure quina és la distància euclidiana del contorn del model respecte el contorn de la peça real, de ser major que un llindar, el contorn serà mostrat en taronja o vermell. El punt base tingut en compte alhora de mesurar la distància és el centre de gravetat, el mateix utilitzat per a trobar la correspondència entre contorns. Exemple a imatges 12 i 13 de l'apèndix.

Errors d'offset als contorns En aquest apartat es centrarà l'anàlisi de mida de contorns, però no del la mida directament, és per això que s'ha d'introduir el concepte

d'*Offset*. Aquest terme és molt comú en el disseny CAD i maquinària de control numèric. Una corba amb un *offset* és una secció tal que tots els punts són a una distància normal fixa [29]. Un *offset* de 0.2 mm d'una línia recta seria simplement una recta paral·lela a 0.2 mm. En el nostre exemple cal extrapolar a polígons, és a dir, a superfícies bidimensionals tancades. Així, un *offset* extern d'un polígon és un altre polígon tal que els seus punts estan a una mateixa distància normal respecte els punts del polígon original, veure exemple a 11.

El concepte d'offset té molt sentit en aquest problema concret, ja que en el tall amb làser el diàmetre del feix de llum pot ser variable depenent de les configuracions de la màquina, aquest valor s'anomena *cutting kerf* 14. Si la màquina intentés tallar un contorn de 5 mm passant exactament per sobre de la línia de tall, si el *kerf* és de 0.2 mm, el resultat seria un contorn de 5.2 mm, és per això que la màquina té diversos mecanismes de software per a corregir aquest error, però s'ha de conèixer quin és el *kerf*. Alhora que la mètrica *offset* pot servir per a trobar el valor del *kerf* donat uns paràmetres màquina (focal, pressió de gas, distància de tall amb el material, velocitat, potència...) també pot ser utilitzat per a trobar errors dimensionals, ja que el concepte és similar. La fórmula per estimar l'*offset* és la mostrada a l'equació 5:

$$o = \frac{(AreaModel - AreaMatch)}{LengthModel} \cdot Scale \quad (5)$$

On: *AreaModel* és l'àrea en píxels que hauria de tenir el contorn (Model) i *AreaMatch* és l'àrea observada. S'utilitza l'escala *Scale* en la que es troba el model (píxels/mm) a l'àrea de treball, a més del llarg del model *LengthModel* com a referència, ja que el llarg del contorn real podria tenir imperfeccions i ser no representatiu. Un *offset* negatiu significa que el contorn és més petit de com hauria de ser realment, i el valor mitjà obtingut en molts contorns és una estimació de com s'hauria de corregir el valor del *kerf* al software.

5.2 Toleràncies en plec

El desenvolupament d'aquesta aplicació no ha sigut realitzat amb l'eina *Halcon*, només s'ha utilitzat codi *python*, amb llibreries externes, principalment *OpenCV*, *scikit-learn*, *scikit-image*, aquestes dues últimes han estat utilitzades per a realitzar tasques que també són possibles amb *OpenCV*, però en aquestes plataformes ofereixen més paràmetres que escollir per als seus algorismes. La disposició de l'entorn de treball consisteix en una càmera fixa que capturi vídeo situada a un lateral de les eines, la matriu i el punxó, de manera que la presa de les imatges sigui com a la figura 4. Tot i així no pot estar col·locada totalment al costat, ja que als extrems de la màquina hi ha laser de seguretat que passa just per sota el punxó en tot moment per a detectar que no hi hagi cap cos que no sigui la xapa, en aquest cas ha de quedar amagada al costat de la matriu. Una altra opció es prendre imatges de d'un lateral. Aquesta desviació serà calibrada com s'especificarà més endavant La càmera no estarà sempre prenent imatges, sinó que només ho farà, per exemple, quan l'operari premi el botó de baixada. Quan el punxó comenci a plegar la xapa o el que és el mateix, quan

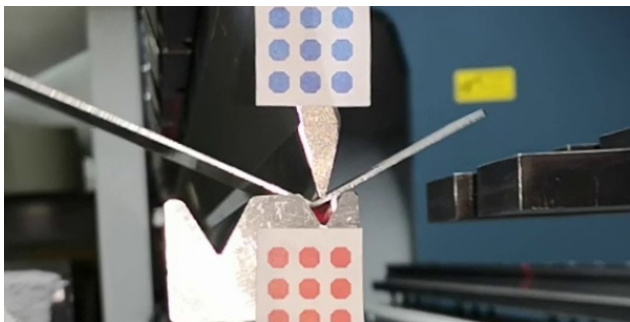


Fig. 4: Vista lateral de captura per la detecció de plec.

arribi a una determinada profunditat, es començarà a mesurar l'angle de la xapa. És important obtenir valors d'angle abans de que el valor del plegat sigui màxim, ja que després del moment de màxima baixada del punxó, quan la peça és alliberada, el material és propens a tornar a la seva forma original, aquest fenomen, l'*springback*, és el valor que hem d'obtenir, a part de l'angle final de plegat. Els passos a realitzar per al mesurament d'angles són: la calibració de l'entorn de treball, la segmentació per *background subtraction* i l'estimació d'angle i *springback*.

5.2.1 Calibració de l'entorn de treball

Al tenir la restricció de no poder col·locar una càmera justament en el lateral de les eines, s'ha de calibrar l'entorn de treball, tot i no tenir aquesta restricció, també seria necessari calibrar per a corregir possibles errors posicionals de la càmera. Primer s'ha de calibrar la càmera, el procediment és el mateix que l'utilitzat amb *OpenCV* anteriorment al calibrar l'entorn de treball de control de contorns 5.1.1, s'utilitzaran els coeficients de distorsió k_1, k_2, p_1, p_2, k_3 per a crear una matriu de correcció de distorsió, que anomenarem D . El següent pas és simular que la càmera està situada en direcció perpendicular al pla de les eines i la peça, és a dir, que formi un vector normal. Per això s'ha col·locat un patró circular de color vermell per a computar una homografia, resultant en una matriu de correcció anomenada H . L'obtenció dels centroides circulars es fa segmentant el color vermell a l'espai de color *HSV* (*Hue, Saturation, Value*) i realitzant *labelling* de cada contorn, els seus centroides seran els punts origen per al càlcul de l'homografia, mentre que els punts destí seran els del mateix objecte però sense distorsió de perspectiva, format partir d'un dels costats del quadrat original. Cada vegada que es mogui la càmera o les eines s'haurà de calibrar l'homografia degut al seu canvi de posició, però la matriu D va associada a la càmera i no cal modificar-la. La sortida de la calibratge de l'entorn de treball serà el mapa de l'equació 6.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{HD} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

5.2.2 Background subtraction

Per a detectar les regions interessants per a obtenir l'angle (parts mòbils) cal filtrar quins píxels pertanyen al fons. Al utilitzar flash, el contorn de les eines i la xapa queda ressaltat, fet que podem aprofitar per a prendre mesures. El

feature detector utilitzat és el filtre Canny [30], un detector de contorns el qual es pot ajustar amb un valor σ el grau de detall que tenen els contorns a detectar, en el nostre cas s'ha seleccionat $\sigma = 2$, ja que un valor més petit fa que apareguin més contorns al lateral de la peça, i un valor més gran provoca que se'n obtinguin uns pocs contorns i amb poca precisió. A partir d'aquest punt, s'han d'aïllar les parts dreta i esquerra en relació al centre de la matriu, que és el punt on canvien els angles, a més d'eliminar la petita part on existeix el radi de plegat. Aquest centre, que és aproximat, es treu traçant una recta amb la matriu de punts vermells utilitzats per calcular l'homografia. A més, resulta d'ajuda no cercar en tota la imatge, si no només la *ROI* (*Region Of Interest*) aproximada de 300×300 px a la dreta i esquerra del punxó.

No és suficient amb aïllar la *ROI* necessària, si no que també s'han utilitzat tècniques de *background subtraction* per a identificar quines són les àrees que no pertanyen al fons, la xapa en moviment o les eines movent-se (aquestes últimes no desitjables) o objectes movent-se en són exemples. *OpenCV* ofereix solucions a aquest problema amb [31], el mètode utilitzat en aquest cas és *GSOC*, el qual no té documentació tècnica, però s'ha realitzat una selecció de paràmetres fins que s'ha trobat el resultat desitjat, modificant el temps que dura un píxel en moviment fora del *background* o el fet de que un píxel pertanyi al fons pugui ser transferida als píxels veïns. El resultat de la segmentació s'utilitzarà com a màscara per seleccionar regions del Canny (figura 6), a més d'aplicar operacions morfològiques amb *scikit-image* de dilatació per a amplificar les regions (figura 5). Un dels problemes trobats ha sigut que degut al treball de les premses hidràuliques la màquina emet una lleugera vibració que dura 2/3 fotogrames, fet que va ser resolt precisament amb aquesta tècnica de segmentació, ja que en els fotogrames sense vibració era suficient amb fer diferències i filtres amb el fotograma anterior i dilatar-ne morfològicament el resultat.



Fig. 5: Background subtraction de peça plegada.

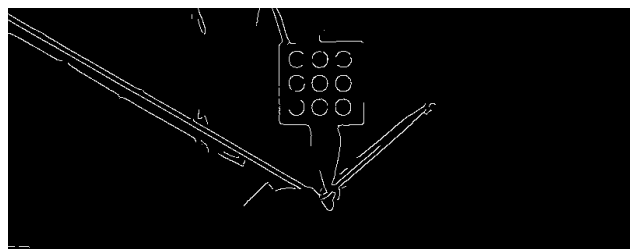


Fig. 6: Detecció de contorns de la peça plegada amb Canny, utilitzant el *background subtraction* de la figura 5.

5.2.3 Detecció d'angle i springback

Els valors obtingut del Canny seran utilitzats per a estimar la inclinació de les rectes als 2 costats i trobar l'angle que formen. En primera instància es va optar per utilitzar la transformada de Hough [32], però tot i després d'eliminar el soroll de la imatge, els màxims a l'espai de Hough tenien massa incertesa per a obtenir un valor fiable, a més de no proporcionar un temps de còmput acceptable, i la variant probabilística de Hough no era viable al tenir encara més incertesa. La segona opció analitzada ha sigut la regressió, descartant des de l'inici la regressió lineal, per la seva sensibilitat als *outliers*. Els candidats per aquesta tasca són la regressió Theil-Sen [33] i l'algoritme *RANSAC* (*Random Sample Consensus*) [34]. Tot i així el primer es va descartar degut als recursos computacionals per a executar-lo, tenint en compte que l'aplicació ha de ser pràcticament en temps real. L'aplicació de *RANSAC* consisteix en aplicar l'algoritme des de que comença el plec fins fins que la peça està plegada i l'eina comença a pujar (detectable amb el patró blau) per així capturar l'angle màxim de plec. *RANSAC* és molt sensible als paràmetres amb els que intenta fer *fitting* amb el model, i al tractar-se d'un algoritme probabilístic, s'haurà de trobar un conjunt de paràmetres per a obtenir un resultat raonable amb una probabilitat alta, $p = 0.99$ per convenció, veure figura 7. Concretament per aquest proble-

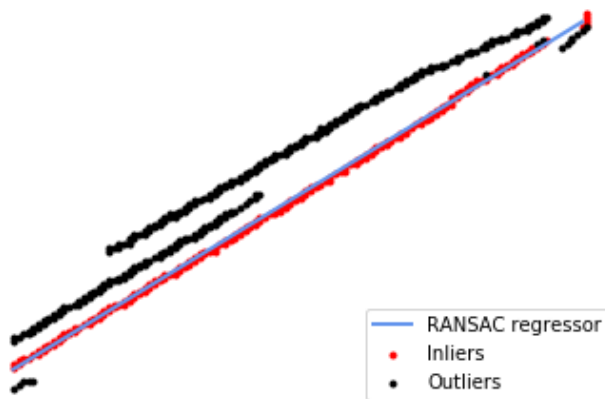


Fig. 7: Estimació de recta mitjançant RANSAC.

ma s'ha escollit un *threshold* $t = 2$ ja que el Canny trobarà els contorns de la peça formant rectes amb els píxels molt propers entre sí, amb un *threshold* més gran en ocasions troba com a model una recta que considera *inliers* uns quants punts de cada recta, proporcionant un error de 2 o 3 graus, veure figures 16 i 17 a l'apèndix. A més, el percentatge d'*outliers* estimat en el cas de tenir una imatge amb molt soroll és $e = 0.7$, de manera que haurem d'ajustar el nombre d'iteracions en base a donar una probabilitat d'èxit amb l'equació 7 en aquest cas el resultat és $N = 50$.

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-e)^s)} \quad (7)$$

On s és el nombre de mostres que es necessiten per a formar el model, en el nostre cas, al tractar-se d'una recta és necessari trobar 2 punts. Tot i així que un fotograma proporciona un valor erroni no té importància, ja que al analitzar tota la funció d'angles per fotograma s'eliminaran valors anòmals. Després, es realitzarà una regressió lineal tenint en compte l'interval des del fotograma amb el màxim angle

de plegat fins que l'eina comenci a pujar (veure figura 8, assegurant que al final de la recta l'angle mesurat és sense tenir contacte amb l'eina. L'angle α serà el valor predit per la regressió en el punt on la mesurament és màxima, mentre que l'angle de plegat β serà el valor predit en el punt on l'eina s'aixeca. L'*springback* final mesurat serà $s = \alpha - \beta$.

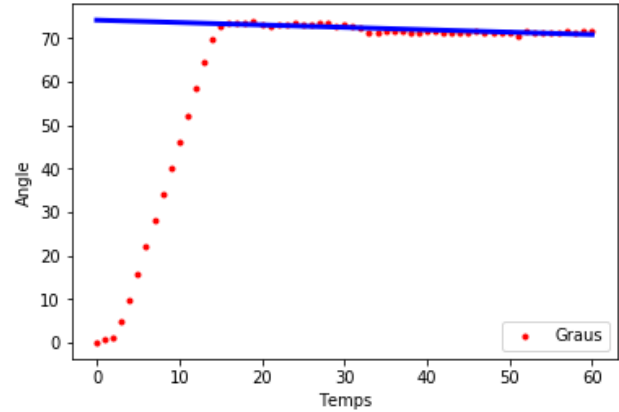


Fig. 8: Evolució de l'angle en els fotogrames.

6 RESULTATS

Un cop elaborat el software de metrologia, s'ha de posar a prova si és capaç d'aconseguir mesurar amb cert grau de precisió. S'han elaborat proves de mesurament tant de desplaçament entre contorns com de mesura d'*offset*. La metodologia d'aquest procés ha sigut la següent: crear peces amb errors dimensionals intencionats, confirmar amb peu de rei o el transportador d'angles si contenen errors no intencionats, i observar si l'error intencionat concorda amb l'error observat.

6.1 Proves de contorns

Per a aquestes proves s'ha fet servir un *backlight* a aproximadament 70 centímetres del sensor, un "Basler ace acA1600-60gc" de resolució 1600×1200 px, amb una òptica amb focal de 25 mm. Al final del procés de calibratge, l'escala detectada de 7.58337 píxels/mm, així que l'àrea d'inspecció és de 211×158 mm.

La tolerància que hauria de tenir la peça és de 0.2 mm de radi d'error, aquests errors dimensionals són arbitraris, l'intenció és detectar-los amb un radi d'error de 0.2 mm, els admissibles segons l'estàndard ISO, a partir d'aquí, es millorara el software si és possible per a afinar l'error.

La primera prova consta d'una peça amb 2 contorns desplaçats 1.3 mm cap a la part inferior, i una altra amb 2 contorns desplaçats diagonalment 0.8 mm. Segons les mesures preses, la detecció de desplaçament ha sigut de 1.32 mm i 1.34 mm (imatge 12 apèndix) per a la primera peça i de 0.77 mm i 0.78 mm en la segona (imatge 13 apèndix). Això dona un radi d'error de 0.04 mm, considerat satisfactori per a ser un primer exemple. Tot i així, aquest error podria ser corregit aplicant diferents mètriques a l'hora d'alinear el *matching* amb el model, ja que l'error en algun contorn provoca que existeixin imperfeccions en l'alineació.

La segona prova consisteix en mesurar l'*offset* en una peça que té un error intencionat de 0.3 mm, és a dir, una peça amb un *offset* en el contorn principal de 0.3 mm, desembocant en una peça 0.6 mm més petita (imatge 15 apèndix). L'*offset* detectat en la peça és de 0.2998 mm, no s'han realitzat suficients proves per a determinar un radi d'error amb un model gaussià, però en aquest cas concret l'estimació ha sigut molt encertada.

En la tercera prova, la peça utilitzada és la mateixa que a la segona, però també té 2 contorns desplaçats 0.8 mm com a la primera prova. El resultat ha sigut similar, i confirma el radi de 0.04 mm de la primera prova, i el valor molt proper aconseguit de *kerf* a la segona, en aquest cas el mesurament d'*offset* és de 0.2968 mm.

6.2 Proves de detecció d'angle

Aquestes proves s'han realitzat amb un mòbil filmant amb qualitat 720p, situat a uns 30 cm de les eines de plec i amb una lleugera inclinació per forçar que la homografia sigui estrictament necessària, també s'ha utilitzat flash. La peça analitzada té un angle mesurat $\alpha = 109.5^\circ \pm 0.5^\circ$ i un *springback* no mesurat, però que es pot observar al vídeo com la peça té la tendència de tornar al seu estat original. Amb el valor *threshold* $t = 12$ l'angle observat ronda els 110–111 graus depenent de l'iteració, produint-se mesures errònies. En canvi, ajustant $t = 2$ com es comenta anteriorment a l'article, després de 10 mesures completes, l'angle mesurat és $\hat{\alpha} = 109.25^\circ \pm 0.2^\circ$ on el radi d'error són dues desviacions estàndard, i l'*springback* mesurat és $\hat{s} = 3^\circ \pm 1^\circ$. En un altre experiment, intentant obtenir un angle mesurat de 80 graus, els resultats han sigut molt similars en marge d'error. Per al mesurament de l'*springback* no és necessari una precisió tant alta com en els graus, a més, no és possible obtenir-ne un valor amb el que comparar-ne la precisió, tot i així, tenint el compte la precisió obtinguda en la mesurament d'angles, el valor és suficient per realitzar correccions.

7 TREBALLS FUTURS

Com les xapes a inspeccionar en el procés de tall eren primes i la distància a l'àrea de treball era considerable (gran longitud focal) ha sigut suficient utilitzant un *backlight* i l'error comès amb la perspectiva no ha sigut representatiu. De ser necessària més precisió, requerir treballar amb gruixos de xapa superiors o analitzar més àrees amb una focal més petita, el següent pas seria segmentar la peça amb una il·luminació superior, per a obtenir més precisió. Tot i així les bases algorítmiques han estat proposades amb aquest article. A partir d'operacions morfològiques, seria possible trobar altres errors als contorns a partir de les aproximacions de l'*offset* i errors posicionals, tant en *Halcon* com amb *OpenCV*, de fet, amb la primera opció seria un objectiu viable a curt plaç. Pel que respecta al control de detecció d'angles, una millora seria aconseguir un mètode de *background subtraction* que sigui més robust a nivell de vibració de la màquina, de manera que la segmentació seria òptima i eliminaria el soroll de fons, resultant en una major precisió, menor temps de còmput i robustesa de l'algorisme.

8 CONCLUSIONS

Les proves de mesurament realitzades han demostrat que és possible afrontar el repte del grau de precisió d'aquest projecte. Les mètriques d'errors han estat pensades molt concretament atacant al cas d'error més típic d'aquest tipus de màquines, i seria extrapolable a més tipus de maquinaria de tall. La mesura del *kerf* amb *backlight* dona un marge d'error similar al que pot arribar a corregir la màquina, fins i tot podria augmentar-se la resolució amb una millor càmera. L'aproximació al problema de detecció d'errors més raonable passa per primer, detectar l'error en el *kerf* amb bona resolució, i després poder examinar en peces més grans l'error posicional de contorns, amb un marge d'error més gran però més acceptable al problema. Les toleràncies obtingudes al plec han superat els requeriments àmpliament. Finalment, la feina realitzada a aquest treball hauria de madurar-se com s'ha exposat a l'apartat de treballs futurs, però és un molt bon exemple de *minimum valuable product*.

AGRAÏMENTS

A la família, a l'ajuda rebuda al laboratori del Centre de visió per computador, especialment a Coen Antens i Felipe Lumbreras, per el seu suport. A Infaimon per a proporcionar la llicència per l'apartat d'*Halcon* i a Muntatges Airges S.L. per l'ofertament incondicional de la maquinària.

REFERÈNCIES

- [1] PRNewswire, "Global industrial machine vision market 2017-2023: Growing demand for application-specific machine vision systems driving the \$12 billion industry." <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-industrial-machine-vision-market-2017-2023-growing-demand-for-application-specific-machine-vision-systems-driving-the-12-billion-industry-300581403.html>.
- [2] H. K. V. F. A. Fennander, "Visual measurement and tracking in laser hybrid welding." <https://doi.org/10.1007/s00138-007-0111-1>.
- [3] G. . C. Sills, K. Bone, "Defect identification on specular machined surfaces." <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0590-1>.
- [4] A. Wilson, "Line-scan cameras check the quality of laser cut parts." <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-21/issue-8/features/line-scan-cameras-check-the-quality-of-laser-cut-parts.html>.
- [5] I. O. for Standardization, "Thermal cutting — classification of thermal cuts — geometrical product specification and quality tolerances." <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9013:ed-3:v1:en>.
- [6] I. O. for Standardization, "General tolerances — part 1: Tolerances for linear and angular

- dimensions without individual tolerance indications.” <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2768:-1:ed-1:vl:en>.
- [7] D. V. M. N. G. Sharad, “Spring back in sheet metal bending - a review.” [http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete\(mech\)-volume4/41.pdf](http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete(mech)-volume4/41.pdf).
- [8] Keasson, “Telecentric lens 2d instant vision measuring system with place and press operation.” <http://www.keasson.cc/sale-10795181-telecentric-lens-2d-instant-vision-measuring-system-with-place-and-press-operation.html>.
- [9] S. imaging, “Vision-based inspection of sheet metal parts by comparing cad data.” <https://www.stemmer-imaging.com/en/applications/vision-based-inspection-of-sheet-metal-parts-by-comparing-cad-data/>.
- [10] S. Metrology, “Sheet metal inspection and reverse engineering.” https://www.sempremetrology.com/measuring_systems/white-light-scanning/planar/sheet-metal-inspection.
- [11] Bystronic, “Laser angle measuring system with automatic correction.” <https://www.youtube.com/watch?v=fiay5jdWQV4>.
- [12] Z. Yi, L. Hao, and F. Ling, “The measurement for sheet metal bending angle of crane boom based on image processing,” pp. 38–41, 09 2013.
- [13] S. K. Kwok and L. W.B., “The development of a machine vision system for adaptive bending of sheet metals,” *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*, vol. 48, pp. 43–49, 01 1995.
- [14] “Camera calibration with opencv.” https://docs.opencv.org/3.4/d4/d94/tutorial_camera_calibration.html.
- [15] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration.” <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/a-flexible-new-technique-for-camera-calibration/>.
- [16] J.-Y. Bouguet, “Camera calibration toolbox for matlab.” http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- [17] M. S. C. Harris, “A combined corner and edge detector.” <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.434.4816&rep=rep1&type=pdf>.
- [18] N. Otsu, *Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE, January 1979.
- [19] M. Moitzi, “A python package to create/manipulate dxf drawings.” <https://pypi.org/project/ezdxf/>.
- [20] MVTEC, *Compensate for Lens Distortions*.
- [21] MVTEC, *Utilització operador threshold-subpix*.
- [22] MVTEC, *Interpolation types*.
- [23] MVTEC, *Quick Guide to the Matching Approaches*.
- [24] MVTEC, *Shape-Based Matching*.
- [25] MVTEC, *Perspective Deformable Matching*.
- [26] MVTEC, *Com considerar la polaritat del model*.
- [27] MVTEC, *Edge Extraction (Subpixel-Precise)*.
- [28] MVTEC, *Chapter 8: Contour Processing*.
- [29] “Definició d’offset.” https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_curve.
- [30] J. Canny, “A computational approach to edge detection,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, pp. 679–698, Nov 1986.
- [31] “Improved background-foreground segmentation methods.” https://docs.opencv.org/3.4/d2/d55/group__bgsegm.html.
- [32] D. Duan, M. Xie, Q. Mo, Z. Han, and Y. Wan, “An improved hough transform for line detection,” in *Computer Application and System Modeling (ICCSM), 2010 International Conference on*, vol. 2, pp. V2–354, IEEE, 2010.
- [33] X. Dang, H. Peng, X. Wang, and H. Zhang, “Theil-sen estimators in a multiple linear regression model,” *Olemiss. edu*, 2008.
- [34] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981.

APÈNDIX

A.1 Apèndix: Imatges

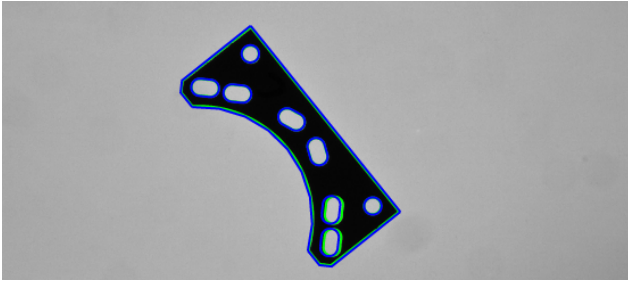


Fig. 9: Exemple de *matching*, es poden observar els contorns del model (Blau) i els detectats (Verd), en una peça amb errors intencionats.

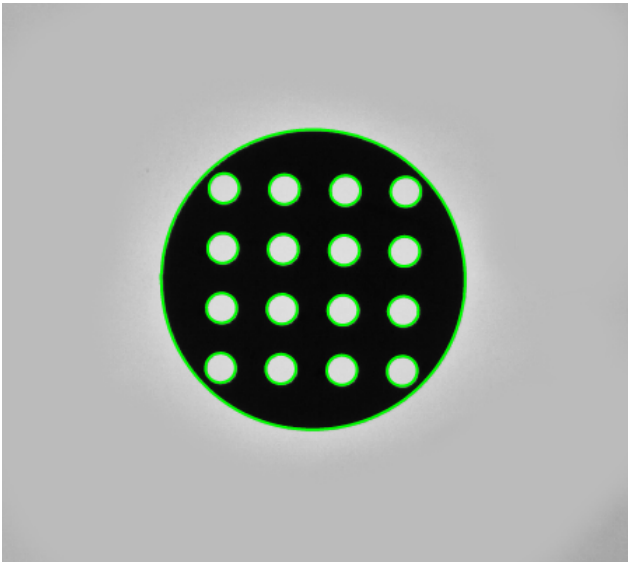


Fig. 10: Platina de calibratge per a trobar el *threshold* i l'escala de l'entorn de treball.

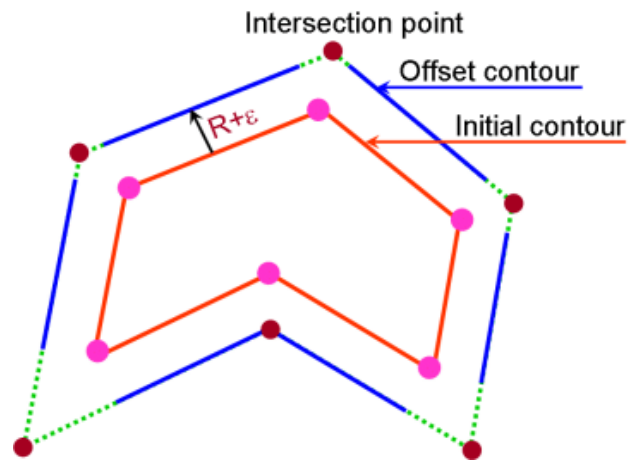


Fig. 11: Exemple de polígon amb *offset*.

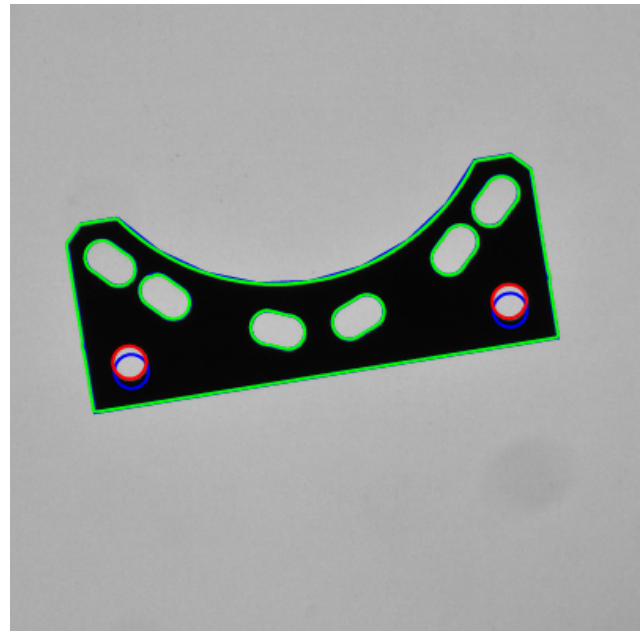


Fig. 12: Detecció d'errors de desplaçament de contorns en vermell, al superar el líndar d'error admissible, dissenyats amb un error d'1.3 mm, l'error observat és de 1.32 mm i 1.34 mm

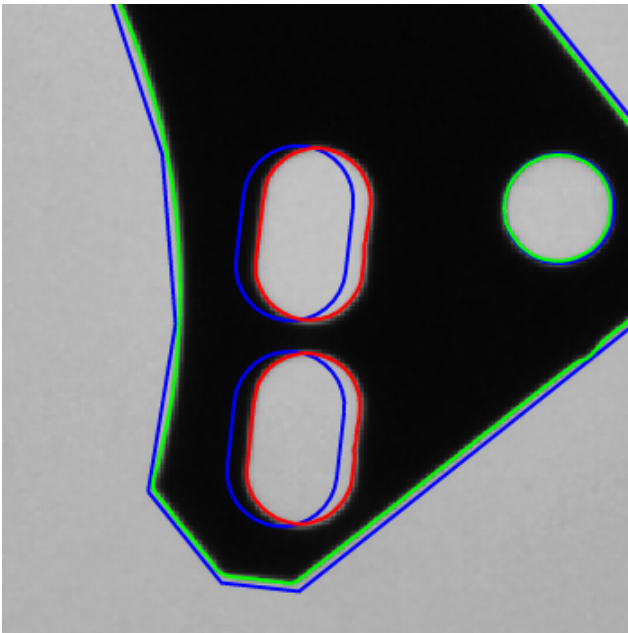


Fig. 13: Detecció d'errors de desplaçament, error de 0.8 mm, l'error observat és de 0.77 mm i 0.79 mm.

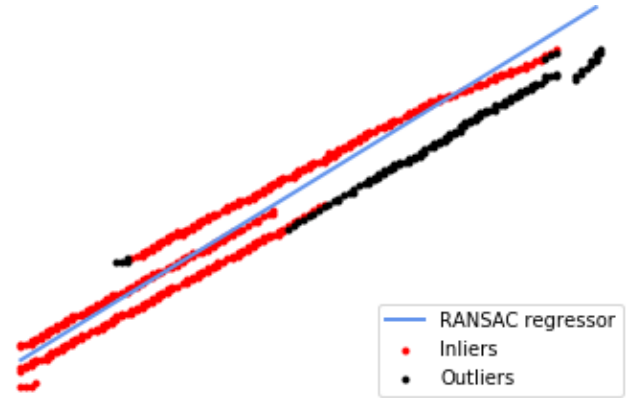


Fig. 16: Ransac amb $t = 12$ prenent *inliers* inadequats.

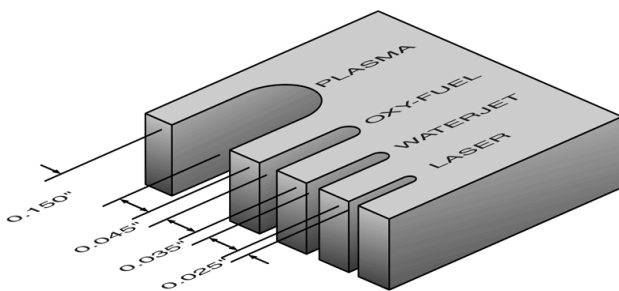


Fig. 14: Representació de concepte de *kerf*, mida de *kerf* de diferents tecnologies de tall (polzades).

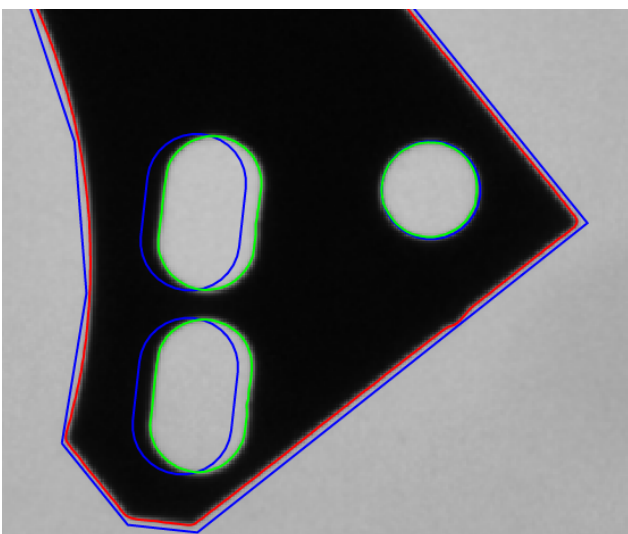


Fig. 15: Detecció d'errors *offset*. Aquest contorn ha estat dissenyat amb un error de 0.3mm, mentre que l'error observat és de 0.2998 mm.

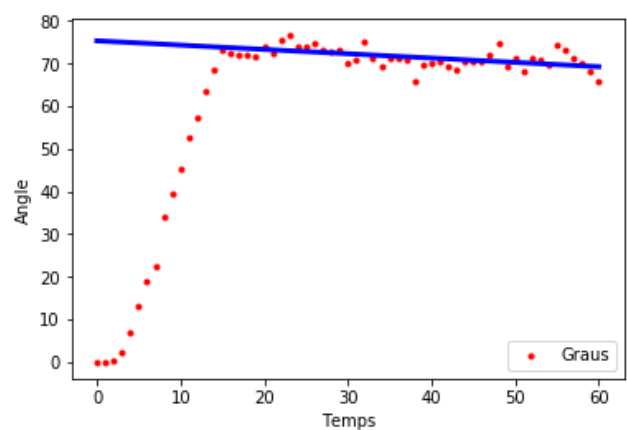


Fig. 17: Incertesa en la regressió causada per un *threshold* massa permissiu en la fase RANSAC, $t = 12$.