
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Cano Ribé, Pau; Antens, Coen, dir. Automatització de la poda d'hivern d'arbres fruiters. 2021. (958 Enginyeria Informàtica)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/257797>

under the terms of the  license

Automatització de la poda d'hivern d'arbres fruiters

Pau Cano Ribé

Resum— En aquest treball es desenvolupa un sistema de reconstrucció de l'estructura d'un arbre fruiter, per a dur a terme el seu posterior anàlisi i trobar els punts de poda ideals, utilitzant mètodes clàssics de visió per computador, a partir de la captura de dues imatges obtingudes en posicions separades 10cm, però en la mateixa orientació, obtenint visió estereoscòpica. Totes les dades d'anàlisi i de test han sigut generades per un mètode també desenvolupat durant aquest treball, permetent generar una gran quantitat d'arbres paramètrics realistes. La precisió del sistema encara és baixa, degut principalment a problemes durant la reconstrucció de l'estructura de l'arbre. Un dels objectius inicials, relacionat amb dissenyar i implementar un sistema robòtic capaç de dur a terme aquesta tasca, ha sigut descartat durant el desenvolupament del projecte per centrar-se en l'anàlisi dels resultats i la seva millora.

Paraules clau— Visió per Computador, Agricultura, Automatització, Poda, Anàlisi d'arbres

Abstract— This thesis covers the development of a system capable of rebuilding and analysing the structure of a fruit tree with the objective of finding the optimal pruning points of such tree, using classical computer visions methods, from two images obtained from two positions separated 10cm but with the same orientation, obtaining stereoscopic vision. All the data used for analysis and test has been generated with a method also developed during this thesis, which is able to generate a big number of realistic, parametric trees. The system's accuracy is still low, mainly due to errors in the tree structure rebuilding phase. Two of the initial objectives, regarding the design and implementation of a robotic system capable of doing this job, have been discarded during the project to focus on the analysis and improvement of the results.

Keywords— Computer Vision, Agriculture, Automation, Pruning, Tree analysis

1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

AUTOMATITZAR tasques ha permès estalviar hores de feina a treballadors i millorar la productivitat a tot el món, i a una gran varietat de sectors. Principalment, l'automatització s'ha centrat en el sector de la manufacturació, que utilitza, segons dades de 2016, el 86% dels robots.[1]

Un dels factors que ha ajudat en l'automatització de més sectors més enllà de la manufactura és la visió per computador, el conjunt de tècniques que permeten a un ordinador, entre d'altres, classificar imatges, reconèixer objectes, reconstruir escenes a partir d'imatges, l'extracció de característiques d'imatges, l'estimació de la posició d'objectes, o l'estimació del moviment d'objectes.

Un sector primari que encara no ha sigut capaç d'automatitzar-se en la seva plenitud, però, és l'agricultura.

La majoria de l'automatització es troba en mètodes d'irrigació, de collita de cereals, i de control de les condicions del sòl i de les plantacions.[2] Tot i així, el sector de la fruita és un dels sectors on menys s'ha implementat l'automatització, ja que tasques com la poda o la collita requereixen major precisió, moviments menys regulars i en espais que permeten poca mobilitat, de manera que, per el moment, es duen a terme majoritàriament per persones.

Donada aquesta situació on la majoria de tasques de poda d'arbres fruiters no estan automatitzades, ni hi ha publicacions que mostrin avanços per a la majoria d'arbres fruiters, l'intenció d'aquest treball és la de desenvolupar un sistema de poda automàtic per a arbres fruiters caducifolis. Concretament, el treball es centrarà en la poda d'hivern de presseguers (*Prunus persica*), tot i que els mateixos principis es podrien aplicar a tots els arbres del gènere *Prunus*, que inclou, entre d'altres, cirerers (*Prunus avium*), prune- res (*Prunus subg. Prunus*), albercocs (*Prunus armeniaca*), nectarines (*Prunus persica*), i ametlles (*Prunus dulcis*).

1.1 Objectius

Ja determinat el context i la intenció del treball, els objectius que es volen aconseguir, desglossats en l'ordre que s'haurien de complir per tal de poder dur a terme el següent

- E-mail de contacte: pau.cano.ribe@gmail.com
- Menció realitzada: Computació
- Treball tutoritzat per: Coen Antens (Unitat de Suport a la Transferència,CVC)
- Curs 2021/2022

objectiu i aconseguir un sistema totalment automàtic per la poda de l'arbre, serien:

- Determinació de l'estructura de les branques d'un arbre fruiter a partir de una o més fotografies
- Determinació dels punts de tall d'un arbre fruiter durant la poda d'hivern
- Disseny d'un sistema robòtic capaç de dur a terme la poda d'un arbre fruiter de manera automàtica
- Implementació virtual del sistema robòtic

1.2 Metodologia

Per a dur a terme aquests objectius en el curt temps disponible per a dur a terme aquest treball, s'utilitzarà una variant d'Extreme Programming (XP) anomenada Extreme Programming For One [3] o Personal Extreme Programming (PXP). Aquesta variant d'XP manté la majoria d'aspectes essencials d'XP:

- Llançaments freqüents del software
- Tests Unitaris
- Simplicitat del codi
- Refactorització del codi
- Adaptació a nous requeriments
- Feedback dels usuaris finals

El principal aspecte d'XP que desapareix és la programació en parelles, però es segueix mantenint el més important: Implementar la solució més senzilla que pugui funcionar.

Per gestionar les tasques amb aquesta metodologia, s'utilitzarà l'eina de KanbanFlow, per poder visualitzar de manera ràpida les tasques completades i les tasques que encara s'han de dur a terme.

2 ESTAT DE L'ART

En els últims anys han aparegut robots capaços de dur a terme algunes d'aquestes tasques, però només per a fruites determinades, i en una disposició determinada. Un exemple és el robot collidor de pomes d'Abundant Robotics, que és capaç de collir les pomes dels arbres de manera automàtica utilitzant tecnologia de succió, però només era capaç de dur aquesta tasca en pomeres formades en espatllera, una tècnica de poda i de formació d'arbres on l'arbre només creix en un pla vertical, podant les branques que surten d'aquest pla.[4] Diverses empreses han desenvolupat sistemes automàtics de poda de pomeres o de vinyes, però sempre amb la restricció de creixer els arbres en espatllera. [5]. Aquest últim any s'ha començat a investigar la poda d'arbres fruiters que no creixin en espatllera utilitzant LiDAR. Tot i així, aquesta tècnica s'està centrant en arbres d'alvocats i mangos[6].

A nivell de software, un dels paquets més utilitzats per a l'anàlisi de vegetació a nivell d'individu és PlantCV[7], un conjunt de funcions de python dedicades a analitzar imatges RGB, NIR, o hiperespectrals, de plantes per trobar-ne certes característiques. Aquests mòduls, però, estan més enfocats

a l'anàlisi de plantes herbàcies petites, més que no a arbres, i no tenen la capacitat d'analitzar, o reconstruir, estructures 3D complexes.

Per a reconstruir la profunditat d'una imatge, en l'actualitat hi ha dues categories de mètodes: els mètodes tradicionals, basats en visió estereoscòpica i en calcular la profunditat a partir de les disparitats entre dues imatges, utilitzant Block Matching Algorithm [8], i els mètodes moderns, basats en visió monocular, i en calcular la profunditat a partir d'una sola imatge i xarxes neuronals[9][10]. Els mètodes basats en visió estereoscòpica són més adaptables a qualsevol tipus d'imatge, però tenen major dificultat en detectar correctament la profunditat al voltant dels contorns dels objectes. Els mètodes basats en visió monocular i xarxes neuronals, en canvi, acostumen a patir menys dificultats amb els contorns dels objectes, però requereixen d'un entrenament previ amb imatges similars a les que es volen analitzar.

La generació paramètrica o automàtica d'arbres que siguin el més realistes possibles és una tasca que es porta anys millorant, la qual ha sigut millorada recentment per Quixel, la principal companyia d'objectes 3D fotorrealistes, al desenvolupar un mètode de generació d'arbres basat en la simulació d'hormones [11]. Tot i així, aquest sistema, per ara, està enfocat a arbres que no s'utilitzen en agricultura, i no tenen el nivell de detall requerit per una tasca com la poda automatitzada.

3 PLANIFICACIÓ INICIAL

La planificació inicial del projecte es pot trobar a la Taula 1. La única tasca que requereix de recursos especials, més enllà d'un ordinador, és la Captura d'imatges i recopilació de mesures, que ha requerit desplaçar-se fins a una plantació de presseguers a Ballobar, Huesca. Algunes de les imatges obtingudes durant aquesta visita es poden veure en les Fig. 1 i Fig. 2

Les tres primeres tasques, la captura d'imatges, la creació dels models 3D, i la programació de l'algorisme de determinació de l'estructura de l'arbre, es podrien dur a terme al mateix temps que la programació de l'algorisme de poda, però dur-les a terme abans permet tenir una millor idea de l'estructura de l'arbre, i de com el sistema podria obtenir i processar les imatges, fet que permet que la programació de l'algorisme de poda no s'hagi de modificar posteriorment per adaptar-se a l'estructura de les imatges del sistema.



Fig. 1: Presseguer de la plantació de Ballobar, Huesca.

TAULA 1: PLANIFICACIÓ INICIAL DE LES TASQUES DEL TREBALL

Tasca	Data inici prevista	Data finalització prevista
Captura d'imatges i recopilació de mesures	24/09/21	26/09/21
Creació models 3D per a proves	27/09/21	20/10/21
Programació de l'algorisme de determinació de l'estructura de l'arbre	21/10/21	7/11/21
Programació de l'algorisme de poda	8/11/21	21/11/21
Comprovació de l'algorisme de poda	22/11/21	5/12/21
Disseny i implementació virtual d'un robot que dugui a terme la poda	6/12/21	10/01/22
Proves virtuals	11/01/22	21/01/22



Fig. 2: L'agricultor Juan Luís Alegre explicant el mètode de poda i punts de poda en un arbre

4 DESENVOLUPAMENT

Des de la data de l'informe inicial fins la data del primer informe de seguiment es va aconseguir dur a terme les dues tasques que hi havia programades en la planificació per aquella data.

La programació d'un sistema paramètric per generar una gran quantitat de models 3D d'arbres es va poder dur a terme en la data prevista, i amb totes les funcionalitats que es tenien previstes. La programació de l'algorisme de determinació de l'estructura de l'arbre, tot i que majoritàriament acabat i funcional, tenia encara alguns errors, que va causar que la data de finalització prevista per a la tasca, i per tant, l'inici de la tasca de programació de l'algorisme de poda, s'atrasassin una setmana.

En el temps entre el primer informe i el segon informe es van dur a terme tres tasques: la finalització de la programació de l'algorisme de determinació de l'estructura de l'arbre, la implementació de l'algorisme de poda, i la comprovació que aquest funcionés en diferents arbres i punts de vista. En total, el projecte anava amb 12 dies de retard respecte la planificació inicial, 5 dies de retard més que en l'últim informe de seguiment. Això va ser degut a una gran quantitat d'errors en l'algorisme de determinació de l'estructura de l'arbre que van aparèixer durant la implementació de l'algorisme de poda, com ara vertexs o arestes duplicades.

Des de la data del segon informe, fins la data de l'informe

final, s'ha seguit treballant en l'algorisme de reconstrucció dels arbres, i s'ha implementat el sistema de visió estereoscòpica, i s'han dissenyat i implementat mètodes d'evaluació de la visió estereoscòpica, de l'estructura de l'arbre, i dels punts de poda. La necessitat d'implementar sistemes d'avaluació dels algorismes desenvolupats, així com els resultats inicials dolents dels mateixos algorismes, ha causat que es decideixi no dur a terme l'objectiu restant del projecte, relacionat amb el disseny i desenvolupament d'un sistema robòtic que dugués a terme la poda automàticament, per tal de poder centrar-se en l'anàlisi i millora dels resultats dels algorismes de reconstrucció i de poda.

4.1 Generació d'arbres

Per a poder dur a terme un gran número de proves virtuals del sistema de poda, és necessari un mètode determinista per generar diferents arbres fruiters, però tots dins de les mesures que es correspondrien amb arbres fruiters reals. No cal generar ni simular les fulles, ja que aquests arbres fruiters es poden a l'hivern, quan ja han perdut totes les fulles. Per aquest motiu, generar únicament les branques no és una simplificació, si no una major aproximació a la realitat.

Per aquest motiu, he dissenyat i implementat un sistema paramètric de generació d'arbres, que utilitza com a paràmetres els valors mínim i màxims d'alçada de la primera branca, longitud de les branques, número de branques a cada separació, i angle de les branques respecte la branca mare, entre d'altres. També s'utilitza un paràmetre de profunditat, que representa l'edat de l'arbre, i controla el número de vegades que les branques es divideixen, com es pot veure a la Fig. 3.

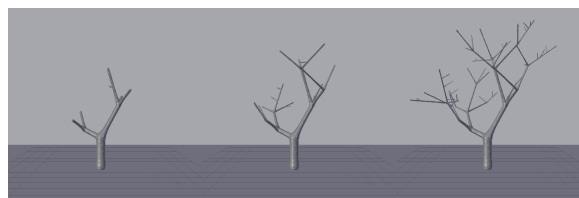


Fig. 3: Efecte del paràmetre Profunditat en la generació d'un arbre virtual. Els valors del paràmetre, per a la imatge corresponent, d'esquerra a dreta, és 2, 3, i 4.

Per a generar els arbres, s'utilitza un algorisme recursiu. Aquest algorisme parteix d'una posició, i de tres eixos, representant els eixos X, Y, i Z d'un espai tridimensional. S'afegeix aquest punt i eixos a una llista de branques a créixer.

La versió simplificada de l'algorisme, on només es genera l'esquelet intern i no la geometria de l'arbre, és la següent:

1. Seleccionar el primer element de la llista de branques a créixer. Si no queda cap element, el procediment ha acabat. Si s'ha pogut seleccionar un, es treu l'element de la llista
2. Crear una branca de longitud L en la direcció de l'eix local Z des de l'origen O . Si l'extrem de la branca és inferior a l'origen, descartar la branca i tornar a l'inici de l'algorisme.
3. Descartar la branca si es creua i està massa a prop d'altres branques.
4. Si la profunditat de la branca és menor a la profunditat màxima, seleccionar un número enter aleatori n de branques entre el nombre màxim i mínim de branques. Per a k entre 0 i n :
 - 4.1. Girar els eixos locals X i Y al voltant de l'eix local Z k/n graus.
 - 4.2. Girar l'eix local Z al voltant del nou eix local X un valor aleatori de graus entre els valors mínim i màxim permesos.
 - 4.3. Determinar la longitud L_n de la nova branca com a un valor aleatori entre el màxim i mínim permesos.
 - 4.4. Afegir a la llista de branques a crear una branca amb origen igual a l'extrem de la branca calculat en el pas 2, els nous eixos locals X , Y , Z , la longitud L_n , i l'amplada igual a la meitat de l'amplada de la branca actual

La geometria s'obté a partir d'aquest conjunt de branques utilitzant *Metaballs* de Blender, i a aquesta geometria se li aplica una fotografia d'escorça utilitzant projecció triplanar per a tal de donar-li una aparença més realista, com es pot veure a la Fig. 4.



Fig. 4: Abre generat amb el sistema paramètric, i renderitzat amb l'escorça aplicada amb projecció triplanar. Imatge renderitzada en Blender.

4.2 Determinació de l'estructura de l'arbre

El sistema de determinació de l'estructura de l'arbre és l'encargat d'extreure l'estructura i posició de les branques d'un arbre a partir d'imatges sobre aquest. El sistema rep com a input dues imatges: una màscara en blanc i negre que indica a quines parts de la imatge corresponen a l'arbre, en blanc, i quines corresponen al fons, en negre; i un imatge en escala de grisos, que indica la distància entre la càmera i el píxel en qüestió. Aquestes dues imatges es poden veure a la Fig. 5.



Fig. 5: Imatges que rep el sistema de determinació de l'estructura com a inputs. A l'esquerra, la màscara que indica quins píxels corresponen a l'arbre, i a la dreta, la imatge en escala de grisos que indica la distància de la càmera al píxel en qüestió.

A partir de la màscara en blanc i negre de l'arbre, es generen dues imatges: el mapa de distància de cada píxel d'arbre fins al fons, i l'esquelet 2D de la imatge de l'arbre, que servirà com a base per reconstruir les branques. A partir de l'imatge de profunditat, trobant els contorns de la imatge amb Sobel i utilitzant un valor llindar, podem trobar els punts on una branca es creua per damunt o per sota d'una altra branca. La informació extreta d'aquestes imatges es pot veure a la Fig. 6

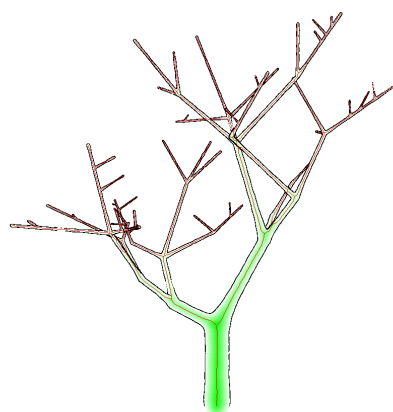


Fig. 6: Imatge que mostra la informació extreta dels inputs del sistema. En negre, els contorns de les branques, mostrant també on es creuen les branques i es tapen unes altres. En vermell i ample d'1px, l'esquelet 2D de l'arbre. En verd, la distància del píxel en qüestió fins a un píxel de fons. A major intensitat de verd, major distància.

Al superposar l'esquelet de l'arbre amb els contorns cal-

culats a partir de l'imatge de profunditat, es troben els punts d'intersecció de les branques. Si a aquests contorns se'ls hi aplica un procés de morfologia de dilatació, seguit d'una erosió amb un kernel menor, s'aconsegueix una àrea ben definida, i sense soroll, al voltant de la qual es troben els últims punts de l'esquelet que corresponen realment amb l'estructura de la branca, i que no es troben deformats per la intersecció de les branques. A partir de la informació local de l'imatge de profunditat en l'àrea d'intersecció, es pot determinar si aquests punts d'intersecció es corresponen a una branca que està sent ocluida per una altra, o si, en canvi, és la branca més propera a la càmera. Aquestes dades es poden veure en la Fig. 8.

Per a reconnectar les dues seccions d'una branca que està ocluida per una branca més propera a la càmera, el primer de tot és necessari saber quina és la trajectòria de la branca fins aquell punt. Per a fer això, es busquen els N primers píxels connectats al punt d'oclusió de la branca ocluida, i es calcula la direcció entre l'últim d'aquests píxels i el píxel on s'oclueix la branca. A partir d'aquest moment, durant K iteracions, o fins que tots els segments de branques estiguin connectats, es duu a terme el següent:

1. Allargar l'extrem virtual de tots els segments de les branques en la direcció de la trajectòria que duia la branca la mateixa quantitat que l'amplada de la branca en el punt d'oclusió, segons del mapa de distància.
2. Si la distància entre dos segments virtuals qualsevol és menor que l'ample més gran dels dos segments, es connecten els dos segments.

El resultat d'aquest procés de connexió de segments es pot veure en la Fig. 9.

L'últim pas necessari abans de recrear l'estructura tridimensional de l'arbre és segmentar l'esquelet trobat en branques individuals. Per fer això, troben els punts de l'esquelet on hi ha més de 2 píxels connectats. Es dilaten aquests punts, i es resta aquest resultat a l'esquelet de l'arbre. A l'esquelet resultant, sense punts de connexió entre branques, se l'hi aplica un procés d'etiquetat, per tal de diferenciar una branca de l'altre. Els resultats es poden veure a la Fig. 10.

A partir d'aquí, es creen vèrtexs a cadascun dels punts trobats on les branques es separen, així com a els altres extrems de les branques connectades a aquests punts de separació, utilitzant les coordenades 2D dels punts, i el seu valor corresponent en el mapa de profunditat, com a coordenades

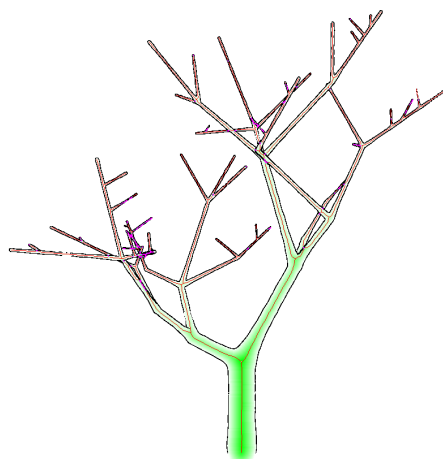


Fig. 8: Imatge que mostra, a més de la informació de la imatge anterior, els punts d'intersecció de branques detectats, en magenta; els punts on les branques més llunyanes s'oclueixen per una branca més propera a la càmera (1px per 1px), en cian; i els punts on una branca propera a la càmera oclueix a una branca més llunyana (1px per 1px), en cian fosc.

3D. Els dos vèrtexs que corresponen a una mateixa branca s'uneixen amb una aresta.

Per a cadascun dels segments de branca que es trobaven ocluits, es duu a terme el següent. Si el segment s'havia pogut connectar, es crea un vèrtex en el punt corresponent al segment, i un vèrtex al punt corresponent al segment connectat, i s'uneixen mitjançant una aresta. Si el segment no s'havia connectat, indica que és una branca que no està ocluida per cap altra, si no que és una branca que creix allunyant-se de la càmera. Per tant, es busca el vèrtex més proper, i s'assigna com a punt d'origen del segment. Seguidament, es busca el final del segment de branca, iterant per l'esquelet fins a trobar un final, o un píxel identificat com a segment de branca. Al trobar el final del segment, es crea un vèrtex en cas que sigui necessari, i s'uneixen els dos vèrtexs amb una aresta. El resultat d'aquest procés es pot veure a la Fig. 11. A partir d'aquesta reconstrucció, es pot visualitzar l'estructura 3D de l'arbre de manera més tradicional, el que permet, per exemple, rotar l'estructura de l'arbre en



Fig. 7: Imatges mostrant l'estructura de l'arbre reconstruït girat verticalment 0°, 20°, 40°, i 90°, respectivament, d'esquerra a dreta.

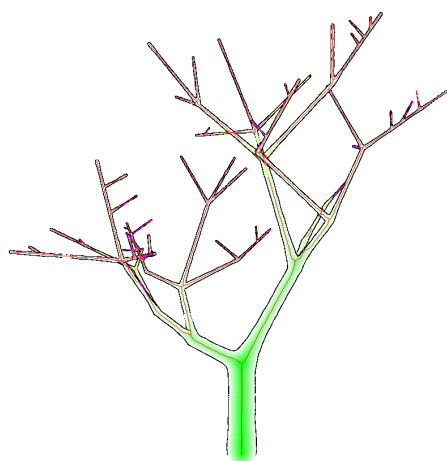


Fig. 9: Imatge que mostra, a més de la informació de la imatge anterior, els píxels utilitzats en el càlcul de la trajectòria del segment de branca, en groc, i els segments que s'han determinat com a connectats, amb la línia que els uneix en taronja.



Fig. 10: A l'esquerra, imatge que mostra els contorns de l'arbre en negre, l'esquelet de l'arbre en vermell, i els punts on es separen les branques en groc. A la dreta, les diferents branques detectades i separades, cadascuna amb un color diferent segons el seu índex.

l'eix vertical al voltant de la seva base, com es pot veure en la Fig. 7

4.3 Poda de l'arbre

El primer pas en determinar quines són les branques que es s'haurien de podar de l'arbre és crear l'estructura jerarquitzada de les branques que conformen l'arbre, començant pel tronc central.

Per a dur a terme això, es procedeix amb el següent algorisme:

1. Seleccionar del conjunt de vèrtexs el vèrtex que es trobi més abaix, i marcar-lo com a cercat.
2. Buscar l'aresta que conté el vèrtex trobat anteriorment. Afegir-la a la llista d'arestes a cercar, juntament amb la branca mare, en aquest cas, una referència nula.
3. Mentre la llista d'arestes a cercar no estigui buida:

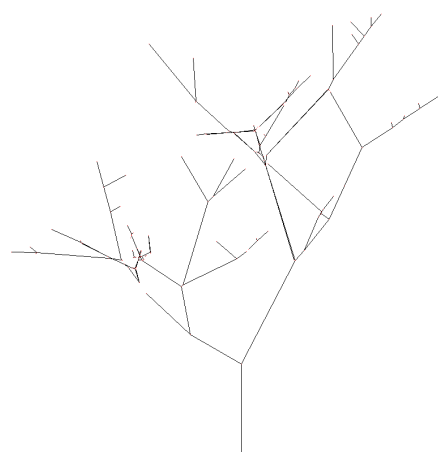


Fig. 11: Imatge que mostra l'estructura 3D reconstruïda de l'arbre. En negre, les arestes de l'arbre, i en vermell, els vèrtexs de la reconstrucció.

- 3.1. Seleccionar i extreure de la llista la primera aresta A i la seva branca mare.
- 3.2. Crear un objecte Branca B a partir de l'aresta i la branca mare.
- 3.3. Seleccionar el vèrtex V que no estigui marcat com a cercat de l'aresta A.
- 3.4. Buscar les arestes connectades a V i afegir-les a la llista d'arestes a cercar, juntament amb la branca B
- 3.5. Marcar el vèrtex V com a cercat.

A partir d'aquesta estructura jerarquitzada, es pot obtenir la distància de cada branca fins a una branca terminal, com $1 + \text{el mínim de la distància de les branques filles fins a una branca terminal}$. Això, juntament amb la identificació de quines branques terminals són possibles punts de brot de flors, permetrà determinar les branques a podar.

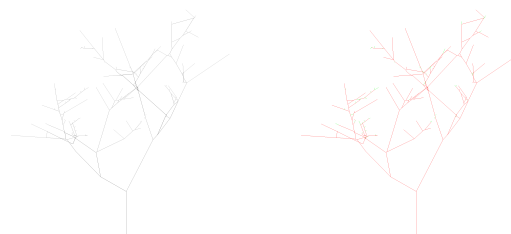


Fig. 12: A l'esquerra, imatge mostrant la distància de cada branca fins a una branca terminal. Colors més foscos indiquen una major distància a una branca terminal. A la dreta, imatge mostrant les branques identificades com a punts de brot de flors, en verd, i la resta de branques, en vermell.

Per determinar si una branca terminal és un punt de brot de flors, només ens cal tenir en compte la seva distància en coordenades globals, el que requereix que tots els vèrtexs hagin sigut transformats a coordenades globals utilitzant la

matriu intrínseca inversa de la càmera i el mapa de profunditat. Si la longitud de la branca terminal es troba entre els valors mínims i màxims establerts per a llocs de brots flors, es considera un brot, i si no, es considera una branca normal. Aquesta informació sobre les branques es pot veure en la Fig. 12

A partir d'aquesta informació, l'algorisme per determinar si una branca s'ha de podar o no, és el següent, començant pel tronc central:

- Es marca la branca com a branca a podar
- Si la branca és un lloc de brot de flors, no podar.
- Si no és així:
 - Comprovar totes les branques filles. Si una branca filla no s'ha de podar, la branca mare tampoc.
 - Si la branca actual està a una distància major de 2 d'una branca terminal, marcar-la com a no podar, ja que és una branca massa antiga.
 - Si la branca actual està a una distància de 2 d'una branca terminal i no s'ha de podar, comprovar les branques filles. Si una branca filla està a distància 1 d'una branca terminal i no s'ha de podar, i la resta de branques filles es troben a una distància 2 o inferior d'una branca terminal, podar totes les branques filles que no estiguin a distància 1 d'una branca terminal.

Una vegada determinades les branques que cal podar, s'ha de trobar el punt per on s'haurien de tallar aquestes branques. Per a trobar aquest punt de tall, es calcula el punt entre el vèrtex inicial de la branca i el vèrtex final de la branca a podar que estigui a una distància del vèrtex inicial igual a quatre vegades l'amplada de la branca en la posició del vèrtex inicial. Aquest valor ha estat escollit per deixar un espai suficient en la branca podada com per que el tall

cicatritzi sense afectar a la branca mare i la seva futura producció de fruita. Aquests punts de tall es poden veure en la Fig. 13.

5 RESULTATS

5.1 Mètodes d'evaluació

El conjunt d'algorismes s'ha evaluat de tres maneres diferents: la precisió en la reconstrucció de la profunditat de la imatge, la similitud en la reconstrucció de l'estructura tridimensional de l'arbre, i la precisió en la selecció dels punts de poda.

5.1.1 Profunditat de la imatge

La profunditat calculada a partir de la visió estereoscòpica del sistema ha sigut comparada amb el profunditat real de la imatge obtinguda durant el procés de *renderitzar* dels arbres a Blender. A partir del conjunt de parelles d'imatges de profunditat, s'ha calculat el Mean Squared Error (MSE) entre les dues imatges, així com la distribució de les diferències entre les dues imatges utilitzant un histograma. Aquesta evaluació ens mostra que les imatges són altament similars, amb, majoritàriament, una distribució normal centrada en el 0, i un MSE de 0.69. Els errors es troben en les parts de la imatge corresponents a les parts laterals de les branques, ja que són les parts de la imatge que només es veuen en una de les dues càmeres del sistema de visió estereoscòpica. Els detalls de l'anàlisi es poden consultar en l'Apèndix A.1.

5.1.2 Reconstrucció de l'estructura tridimensional

Per evaluar la reconstrucció de l'estructura tridimensional de l'arbre i comparar-la amb l'esquelet real de l'arbre generat utilitzant el mètode paramètric explicat en el treball, s'ha utilitzat una mètrica basada en la distància entre els vèrtexs de l'esquelet reconstruït, i les arestes de l'esquelet generat paramètricament, i viceversa. El valor d'aquesta mètrica, que anomenarem Distància d'Error, corresponent a

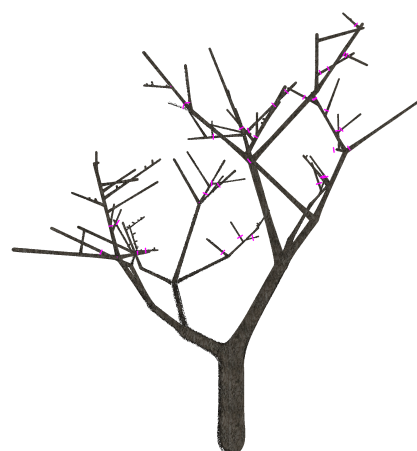
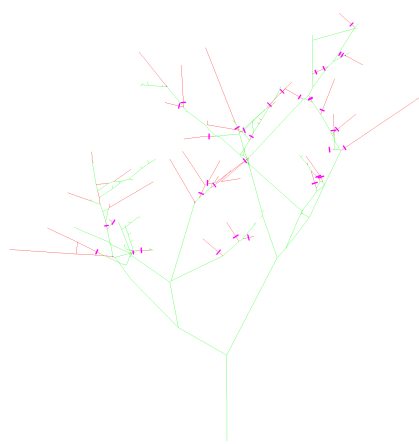


Fig. 13: Imatges mostrant els punts de poda de l'arbre en lila. A l'esquerra, es poden veure en verd les branques que no calia podar, en vermell les branques a podar, i en lila, els punts de poda. A la dreta, es poden veure els mateixos punts de poda, visualitzats a sobre l'imatge original de l'arbre.

TAULA 2: EVALUACIÓ DE L'ESTRUCTURA RECONSTRUIDA SEGONS LA PROFUNDITAT DE L'ARBRE

Profunditat d'arbre	Distància d'Error mitjana(m)	Distància de Hausdorff mitjana(m)	Distància d'Error Mínima mitjana(m)	Amplada (m)
1	0.012±0.004	0.031±0.018	0.004±0.004	1.5
2	0.032±0.017	0.159±0.086	0.001±0.001	2.0
3	0.026±0.009	0.177±0.018	0.000±0.000	3.0
4	0.049±0.013	0.354±0.104	0.000±0.000	3.5
Mitjana	0.033±0.018	0.206±0.120	0.001±0.002	2.5

una reconstrucció perfecte de l'estructura de l'arbre correspondria a 0, i valors més elevats representarien una major discrepància entre l'esquelet reconstruït i l'esquelet generat paramètricament. La mètrica es pot expressar com

$$d(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) = \sup \left\{ \overline{d(x, \mathcal{Y})} x \in \mathcal{X}, \overline{d(\mathcal{X}, y)} y \in \mathcal{Y} \right\} \quad (1)$$

on $d(x, \mathcal{Y})$ representa la distància mínima entre el vèrtex x a l'esquelet $\mathcal{Y}$.

També s'utilitzen dues variacions d'aquesta mètrica, utilitzant respectivament, la distància màxima, coneguda com a Distància de Hausdorff, i la mínima, en comptes de la mitjana de les distàncies. Aquestes dues mètriques es poden expressar de la següent manera, respectivament.

$$d(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) = \sup \{ \sup \{ d(x, \mathcal{Y}) x \in \mathcal{X} \}, \sup \{ d(\mathcal{X}, y) y \in \mathcal{Y} \} \} \quad (2)$$

$$d(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) = \sup \{ \min \{ d(x, \mathcal{Y}) x \in \mathcal{X} \}, \min \{ d(\mathcal{X}, y) y \in \mathcal{Y} \} \} \quad (3)$$

Utilitzant aquestes 3 mètriques hem obtingut els valors mitjans per a 4 grups diferents d'arbres, classificats segons la seva profunditat, que es poden veure a la taula 2. Com es pot veure a la taula, els resultats són bons, però la Distància d'Error incrementa per a arbres amb major profunditat.

Imatges mostrant la superposició dels esquelets reconstruïts sobre l'esquelet generat paramètricament es poden trobar a l'Apèndix A.2.

5.1.3 Algorisme de poda

Per evaluar l'algorisme de poda, s'ha modificat l'algorisme de generació dels arbres per tal que generi també un *ground truth* sobre quines branques s'han de podar i quines no, identificant un volum d'espai per a cada branca, com es pot veure a la Fig. 14. Els punts de poda determinats per l'algorisme de poda es llegeixen, i es comproven si es troben dins del volum determinat d'una branca. D'aquesta manera, podem classificar els punts de poda en 3 grups, visibles a la Fig. 14:

- Punts correctes: El punt de poda es troba dins d'una branca que s'ha de podar
- Punts erronis: El punt de poda es troba dins d'una branca que no s'ha de podar
- Punts neutrals: El punt de poda no es troba dins de cap branca, o es troba en una branca que ja té un altre punt de poda.

D'aquesta informació també podem extreure el número de branques fallades, és a dir, el número de branques que s'haurien de podar, i a les que no se'ls hi ha trobat cap punt

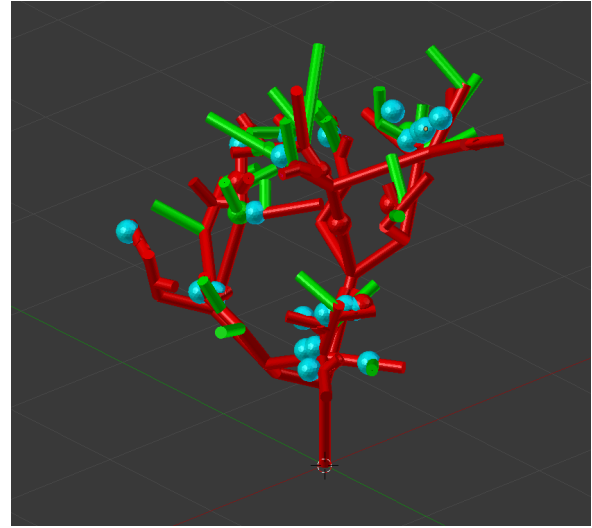


Fig. 14: Imatge que mostra el *ground truth* sobre les branques a podar, i els punts de poda trobats. Els cilindres verds corresponen a branques que s'han de podar, els cilindres vermells a branques que no s'han de podar. Les esferes verdes corresponen a punts de poda correctes, les esferes vermelles a punts de poda incorrectes, i les esferes blaves a punts de poda neutrals.

de poda. Per a poder evaluar com de proper és el punt de tall a la branca que s'ha de podar, es generen tres volums al voltant de cada branca, amb un radi de 4cm, 6cm, i 8cm respectivament. Els resultats d'aplicar aquest mètode d'evaluació al conjunt d'arbres de prova, així com als subconjunts separats segons la profunditat de cada arbre, es poden veure a les taules 3 a 7.

TAULA 3: EVALUACIÓ DE L'ALGORISME DE PODA PER AL CONJUNT D'ARBRES DE PROVA

Distància acceptada (cm)	Talls correctes (%)	Talls Erronis (%)	Talls neutrals (%)	Talls Fallats (%)
4	7.0±6.0	19.3±14.0	73.8±17.0	89.1±8.7
6	12.3±8.5	31.1±17.8	56.6±23.3	81.4±12.6
8	19.8±10.6	36.0±16.6	44.2±23.6	70.6±14.5

TAULA 4: EVALUACIÓ DE L'ALGORISME DE PODA PER AL SUBCONJUNT D'ARBRES DE PROFUNDITAT 1

Distància acceptada (cm)	Talls correctes (%)	Talls Erronis (%)	Talls neutrals (%)	Talls Fallats (%)
4	0.0±0.0	0.0±0.0	100.0±0.0	100.0±0.0
6	0.0±0.0	0.0±0.0	100.0±0.0	100.0±0.0
8	17.5±24.7	16.3±23.0	66.3±47.7	77.4±31.9

TAULA 5: EVALUACIÓ DE L'ALGORISME DE PODA PER AL SUBCONJUNT D'ARBRES DE PROFUNDITAT 2

Distància acceptada (cm)	Talls correctes (%)	Talls Erronis (%)	Talls neutrals (%)	Talls Fallats (%)
4	4.8±5.0	14.0±13.7	55.2±34.2	64.0±38.3
6	8.5±7.3	22.8±19.0	44.7±31.1	60.7±35.6
8	16.1±9.5	27.2±18.2	39.0±26.1	55.2±29.1

TAULA 6: EVALUACIÓ DE L'ALGORISME DE PODA PER AL SUBCONJUNT D'ARBRES DE PROFUNDITAT 3

Distància acceptada (cm)	Talls correctes (%)	Talls Erronis (%)	Talls neutrals (%)	Talls Fallats (%)
4	10.9±2.2	24.7±5.6	64.4±6.4	83.8±4.8
6	17.6±5.6	34.9±7.3	47.6±9.0	74.4±8.5
8	26.6±10.1	40.8±5.2	32.7±7.9	62.1±12.3

TAULA 7: EVALUACIÓ DE L'ALGORISME DE PODA PER AL SUBCONJUNT D'ARBRES DE PROFUNDITAT 4

Distància acceptada (cm)	Talls correctes (%)	Talls Erronis (%)	Talls neutrals (%)	Talls Fallats (%)
4	7.2±5.0	19.3±8.2	73.5±6.5	87.5±6.0
6	12.6±5.8	31.8±9.9	55.6±8.1	77.0±8.0
8	17.2±4.4	35.6±9.1	46.3±8.4	68.1±5.1

5.2 Punts dèbils del sistema i errors més habituals

Els errors en l'algorisme de poden es troben sempre causats per una reconstrucció errònea de l'estructura tridimensional de l'arbre, que provoca problemes a l'hora de construir la jerarquia de branques. Els tres principals causants d'errors en reconstrucció de l'arbre són: l'aparició de bucles durant la reconstrucció de l'estructura, errors en la unió entre vèrtexs en posicions molt properes, i problemes per detectar correctament els punts de brot de flors.

El problema amb l'aparició de bucles es pot veure en la Fig. 15. En el cas mostrat, l'aparició d'un bucle causa que la branca central, marcada en vermell, finalitzi dins del la elipse daurada, en comptes de dividir-se en les branques filles. Això és degut a que, en la creació de la jerarquia, una branca només pot tenir una branca mare, i en aquest cas, la part dins de l'elipse daurada s'ha determinat com a filla de la branca verda inferior, en comptes de la branca vermella central. Això causa que es determini que la branca vermella no té branques filles, i que, per tant, és una branca terminal sense llocs d'aparició de fulles i s'ha de podar. En un cas sense bucle, la jerarquia de la branca central es determinaria correctament, i la branca no es marcaria com a punt de poda.

Un dels problemes causats per la assignació incorrecta de vèrtexs durant la generació d'arestes es pot veure en la Fig. 16. En aquest cas, les arestes no tenen assignades els

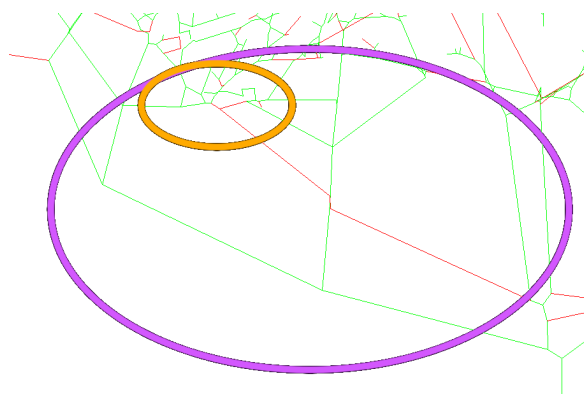


Fig. 15: Imatge que mostra les branques d'una secció d'un arbre. Les línies verdes representen branques que no s'han de podar, mentre que les línies vermelles representen branques que estan marcades per a podar. L'elipse lila delimita la zona on es troba el bucle problemàtic en l'estructura de l'arbre, i l'elipse daurada senyala la zona del bucle que causa problemes en la jerarquia de l'arbre.

vèrtexs correctes, fet que causa que les dues branques centrals quedin marcades erroniamment per a podar, al no quedar connectades amb les branques filles, fet que resulta en les branques sent etiquetades com a branques terminals sense punts de brot de flors. Tot i que la causa és diferent, la conseqüència és la mateixa que l'aparició de bucles.

6 CONCLUSIONS

El sistema desenvolupat durant el projecte per generar arbres paramètrics realistes acompanyats de la informació corresponent sobre la seva poda ha funcionat perfectament, i ha permès generar una gran quantitat d'arbres per a utilitzar com a tests del sistema de poda. El sistema de poda generat, que utilitza visió estereoscòpica a partir de dues imatges, permet una reconstrucció bastant exacte de l'estructura tridimensional de l'arbre fotografiat si es té una màscara que indiqui quina part de la imatge correspon a arbre i quina part correspon al fons de la imatge.

Tot i la bona reconstrucció de l'arbre en la majoria d'ocasions, amb una Distància d'Error mitjana de 3cm, errors en la reconstrucció de l'arbre que duguin a l'aparició de bucles de vèrtexs en l'estructura de l'arbre, així com errors causats per l'oclusió d'algunes branques, porten a que la generació de la jerarquia de branques de l'arbre, necessària per a la determinació dels punts de poda, no sigui la correcta, el que causa errors en la determinació dels punts de poda. Tot i així, el sistema encerta entre un 10% i un 20% dels punts de poda calculats, un valor que incrementaria si es trobés la manera de millorar la fase de reconstrucció de l'estructura tridimensional de l'arbre.

Una possible millora del sistema de reconstrucció seria la utilització d'una xarxa neuronal. Com que el sistema de generació d'arbres paramètrics crea també l'estructura interna de l'arbre, seria fàcilment automatitzable la generació de milers d'arbres paramètrics i les corresponents imatges estereoscòpiques renderitzades que permetessin entrenar una xarxa neuronal que rebés les imatges estereoscòpiques i retornés l'estructura tridimensional de l'arbre.

Adicionalment, per millorar la poda, seria necessari im-

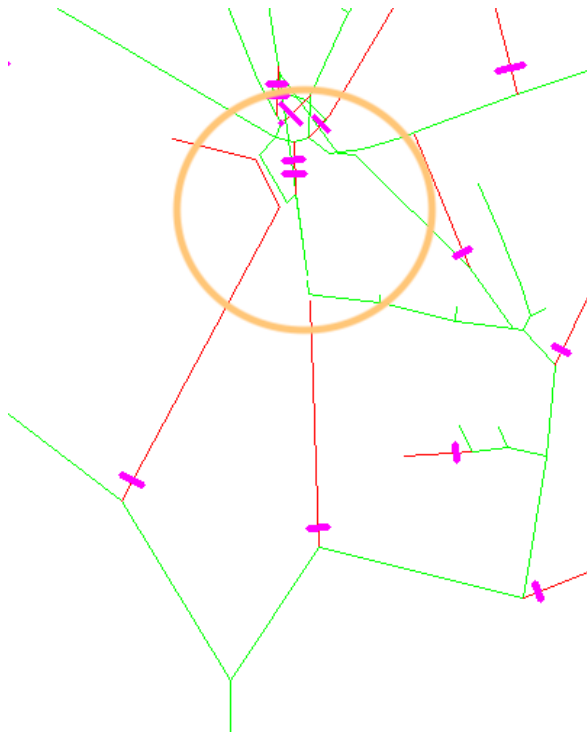


Fig. 16: Imatge que mostra les branques d'una secció d'un arbre. Les línies verdes representen branques que no s'han de podar, mentre que les línies vermelles representen branques que estan marcades per a podar per a la línia lila. L'elipse daurada delimita la zona on es troben els punts erronis en l'estructura de l'arbre i que causen problemes en la jerarquia de l'arbre.

plementar en l'algorisme dades sobre el color de les branques, per categoritzar el seu nivell productiu, així com informació sobre si les branques estan assecades. També, per millorar l'algorisme, seria necessari implementar un mètode que quantifiqués la quantitat de llum que rebria cada branca, així com informació sobre l'orientació en la que incideix la llum solar, i informació sobre el vent principal en la zona, per compensar la tendència de les branques a inclinar-se en la direcció del vent.

Els objectius inicials referents a la part de software han sigut assolits, tot i que encara hi hagi situacions que causin resultats erronis en els algorismes. Els objectius inicials referents al desenvolupament d'un sistema robòtic van haver de ser abandonats per centrar-se en l'anàlisi i millora dels resultats de la part de software del projecte. Amb més temps, o ignorant els mals resultats de la part de software, hauria sigut assequible dur a terme aquests objectius.

AGRAÏMENTS

M'agradaria agrair a Juan Luís Alegre la inspiració per aquest projecte, així com el seu guiatge, coneixement, i suport a l'hora d'explicar els mètodes de poda més utilitzats, de proveir-me amb arbres que pogués estudiar, i d'aportar *feedback* als resultats del projecte.

M'agradaria també agrair al meu tutor del TFG, Coen Antens, pel seu suport durant el desenvolupament del projecte, així com les seves idees a l'hora d'evaluar i millorar parts del projecte.

REFERÈNCIES

- [1] Oxford Economics. How robots change the world: What automation really means for jobs and productivity. 2019.
- [2] Smart farming: How automation is transforming agriculture. <https://stories.pinduoduo-global.com/agritech-hub/how-smart-farming-automation-is-transforming-agriculture>, 2021.
- [3] Extreme programming for one. <https://wiki.c2.com/?ExtremeProgrammingForOne>, 2014.
- [4] Steve Crowe. Abundant robotics shuts down fruit harvesting business. <https://www.therobotreport.com/abundant-robotics-shuts-down-fruit-harvesting-business/>, 2021.
- [5] Richard Lehnert. Automated pruning with robotics. <https://www.goodfruit.com/automated-pruning-with-robotics/>, 2015.
- [6] M. Bryson F. Westling, J. Underwood. A procedure for automated tree pruning suggestion using lidar scans of fruit trees. 2021.
- [7] Plantcv. <https://plantcv.readthedocs.io/en/stable/>, 2020.
- [8] Depth perception using stereo camera (python/c++). <https://learnopencv.com/depth-perception-using-stereo-camera-python-c/>, 2021.
- [9] V. Peluso et al. Monocular depth perception on micro-controllers for edge applications. 2021.
- [10] Monocular depth estimation. https://keras.io/examples/vision/depth_estimation/, 2021.
- [11] Megascans trees are now in early access. <https://quixel.com/blog/2021/12/15/megascans-trees-are-now-in-early-access>, 2021.

APÈNDIX

A.1 Anàlisi de la profunditat estereoscòpica

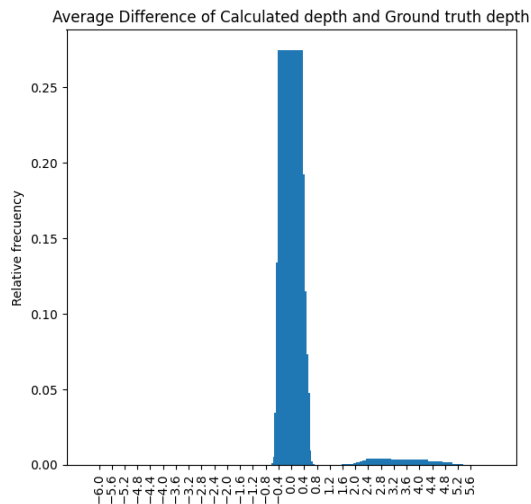


Fig. 17: Histograma de diferències entre la profunditat real de la imatge i la profunditat calculada per visió estereoscòpica.



Fig. 18: Imatge que mostra les diferències entre la profunditat real de la imatge i la profunditat calculada per la visió estereoscòpica. El gris indica que el valor calculat i el real són iguals. Els colors foscos indiquen que la profunditat calculada és més gran que la profunditat real, mentre que els colors clars indiquen que la profunditat calculada és menor que la profunditat real.

A.2 Imatges de similitud entre les estructures tridimensionals dels arbres

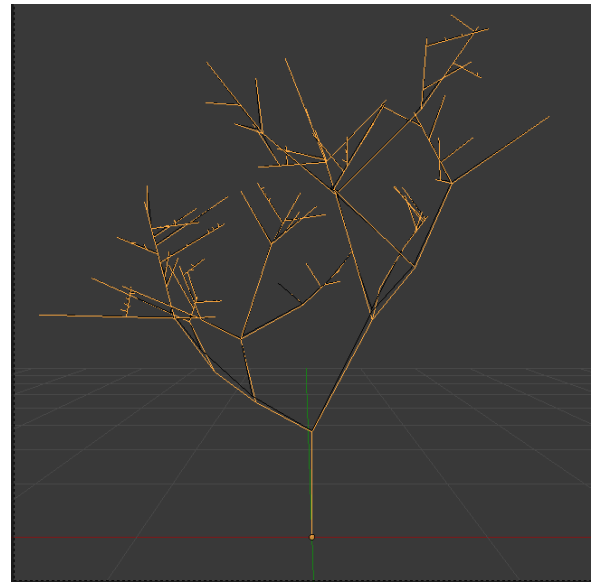


Fig. 19: Imatge que mostra l'esquelet real de l'arbre, en taronja, superposat amb l'esquelet determinat pel sistema de reconstrucció de l'estructura, en negre.

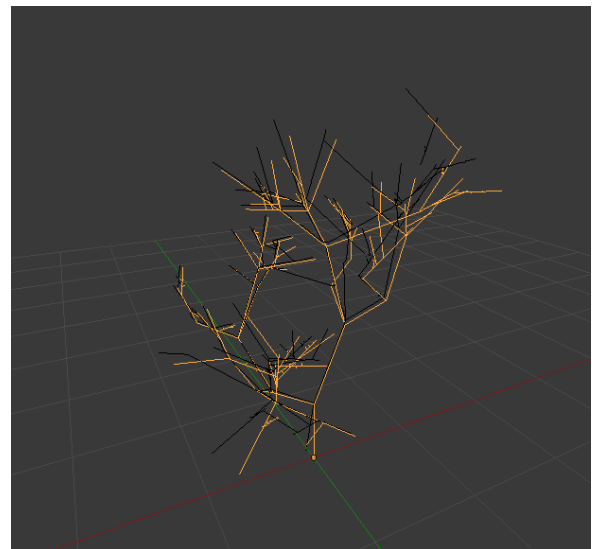


Fig. 20: Imatge que mostra l'esquelet real de l'arbre, en taronja, superposat amb l'esquelet determinat pel sistema de reconstrucció de l'estructura, en negre.