

Fotogrammetri

En guide till god hantering



SND

Svensk nationell datatjänst

2019-10-29

Översatt, omarbetat och kompletterat av Sofia Agnesten

PDF/A-1 (ISO 19005-1), skapat i Microsoft Office 2016 från formatet "docx"

Fotogrammetri: En guide till god hantering

Översatt från Archaeology Data Service's "Close-Range Photogrammetry: A Guide to Good Practice" (<http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/Main>), varefter det har omarbetats och kompletterats för att även passa andra datamaterial med annat ursprung än arkeologi.

Innehåll

1. Introduktion till fotogrammetri	5
1.1 Vad är fotogrammetri?	6
Användningsområde?	7
1.2 Att tänka på.....	8
2. Att tänka på när man skapar 3D-modeller med fotogrammetri	9
2.1 Allmänna överväganden	9
2.2 Metoder för fotogrammetri.....	9
Kamerakalibrering	9
Bildinsamling	10
Referenssystem, orientering och exakthet.....	11
Bildbehandling	13
Hur en tredimensionell fotogrammetrimodell skapas	14
3. Långtidslagring av fotogrammetridata	19
3.1 Vilka filer skall bevaras?.....	19
3.2 Hur ska det bevaras?	19
Viktiga egenskaper	19
Rekommenderade filformat	21
3.3 Metadata och dokumentation	22
Bildmetadata	22
Kamerametadata	23
Metadata för referenssystem	25
Modellmetadata.....	26
4. Filformat	27
5. Bibliografi	34

1. Introduktion till fotogrammetri

Fotogrammetri är ett teknikområde där fotografier används för olika slags mätningar. Fotogrammetri kan bland annat användas för att bestämma exakta positioner för geografiska element (till exempel för topografiska kartor), men också för att skapa vridbara 3D-modeller av fotograferade objekt eller för att skapa 3D-visualiseringar av olika slag. Den här guiden syftar till att ge en vägledning om vad man bör tänka på både inför och under arbetet med dokumentation och långtidsbevarande av dataset som framställts genom digital fotogrammetri. Guiden tar upp vanliga filformat som används för lagring av fotogrammetrifiler och vilka av dessa som är lämpliga att använda för långtidsbevarande. Guiden tar också upp strategier för långtidsbevarande som man kan använda för att säkerställa att kvaliteten bibehålls hos fotogrammetrifilerna efter förberedelser för långtidsbevarande. Guiden bygger på befintliga dokumentationsstandarder och beskriver de fotogrammetridata som anses viktiga att bevara för framtida användning.

Fotogrammetri kan utföras från långt avstånd, till exempel från en drönare eller ett flygplan, eller på nära håll med handhållen kamera eller kamera på stativ. Datainsamling med drönare eller flygplan resulterar ofta i mycket stora datamängder och kräver (till viss del) annan datahantering än data som har samlats in med markbaserad fotogrammetri. Guiden är därför avgränsad till markbaserad fotogrammetri som utförs på nära håll med digitalkamera.

En vanlig gren inom fotogrammetrin är Structure-from-Motion (SfM). SfM bygger på samma principer som annan fotogrammetri och syftar till att skapa 3D-modeller, men är mer användarvänlig och har lägre noggrannhetskrav. Exempelvis kräver SfM varken kamerakalibrering eller avancerad kamerautrustning. Guiden riktar sig även till personer som arbetar med SfM och information om filformat, metadata och viktiga egenskaper är desamma för alla som arbetar med fotografibaserade 3D-rekonstruktioner oavsett noggrannhetsnivå.

1.1 Vad är fotogrammetri?

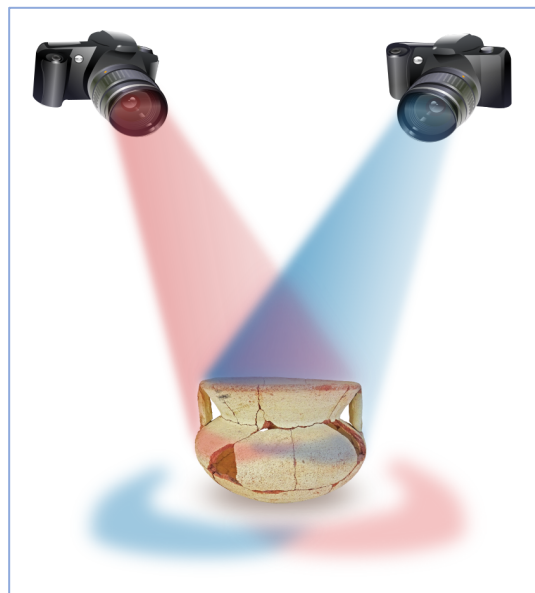
Fotogrammetri är ett samlingsbegrepp för olika typer av mätningar som kan göras med hjälp av fotografier. Fotogrammetri som teknikområde uppfanns på 1800-talet och under 1900-talet utvecklades olika metoder. Förenklat kan man tala om tre grenar; *analog*, *analytisk* och *digital* fotogrammetri.

- **Analog fotogrammetri** återskapar bildorienteringar mekaniskt eller optiskt i analoga stereoinstrument.
- **Analytisk fotogrammetri** återskapar dessa matematiskt och bilderna korrigeras mekaniskt i sina bildhållare under mätningar i analytiska stereoinstrument.
- **Digital fotogrammetri** använder enbart digitala metoder för att återskapa och presentera bildgeometrier.

Den digitala grenen har mer eller mindre kommit att ersätta sina analoga och analytiska föregångare och fotografierna som används är så gott som uteslutande i digital form.

Med hjälp av fotogrammetri kan man bestämma storlek, form och läge hos avbildade objekt. Fotogrammetrisk mätning kan utföras från en enda bild, från ett

bildpar (stereo) eller från ett block av bilder (tre eller fler fotografier). 3D-modeller som genereras med hjälp av andra metoder än fotogrammetri (till exempel 3D-grafik till dataspel) består vanligtvis av en underliggande geometri som olika texturer och materialegenskaper appliceras ovanpå. En fotogrammetrimodell får sin form genom triangulering¹. Det är kamerans olika positioner i förhållande till det fotograferade objektet som bestämmer vilken form 3D-objektet ska få. 3D-modeller skapade med



Figur 1: När ett objekt fotograferas från två eller fler vinklar (och bilderna överlappar varandra till minst 50 %) så kan informationen användas för att göra olika typer av beräkningar eller för att skapa 3D-visualiseringar av det fotograferade objektet.

¹ <https://sv.wikipedia.org/wiki/Triangulering> (2019-10-28)

fotogrammetri hämtar texturinformation direkt från fotografierna. Resultatet kan därför bli väldigt verklighetstroget och likt originalet.

Användningsområde?

Fotogrammetri används som forskningsunderlag, dokumentationsmetod eller för att generera 3D-visualiseringar som kan användas för att visa hur någonting ser ut eller kommer att se ut. Det används bland annat inom geovetenskaperna, kulturarvsfältet, arkitektur, kriminologi och industri. Fotogrammetri kan kombineras med andra tekniker, som motion-capture, GIS, BIM eller CAD. Till skillnad från laserscannrar som kan vara mycket dyra att införskaffa är fotogrammetri en förhållandevis konstandseffektiv teknik och kan i vissa fall ersätta laserscannern som dokumentationsmetod. Allt som krävs är en någorlunda kvalitativ digitalkamera och en dator med fotogrammetriprogramvara. Fördelen med en fotogrammetrisk 3D-modell jämfört med tvådimensionella rasterbilder är att en betraktare får möjlighet att vrida och vända på modellen och studera den från många vinklar. Därmed är det ett pedagogiskt och rätt effektivt redskap för förmedling.

Tillämpning av fotogrammetri inom kulturarvsfältet blir allt vanligare och begränsas sällan av storleken på objekten som ska dokumenteras. Tredimensionella fotogrammetrimodeller kan skapas av allt från små föremål, till exempel mynt eller bearbetade stenredskap, till hela byggnader och monument. Ett exempel där fotogrammetri har använts för att dokumentera ett mycket stort objekt är den rekonstruktion som gjordes av en Buddhastaty i Afghanistan. Statyn som var 53 meter hög och utmejslad ur en bergvägg spränges i bitar av Talibanerna 2001. Efter sprängningen samlade ett forskarlag från ETH Zürich in fotografier från privatpersoner (via internet) och kompletterade med semesterfotografier som togs av en turist på 1960-talet. Man hade ett tillräckligt stort underlag för att kunna skapa en fotogrammetrisk modell av statyn. Från 3D-modellen kunde man sedan skapa en fysisk rekonstruktion (skala 1:200)².

² <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/147846/1/eth-26930-01.pdf>
(2019-10-28)

1.2 Att tänka på

De val som görs i början av projektet kommer att prägla hela fotogrammetriprocessen och inverka på den färdiga produkten. Exempelvis går det att använda en mobiltelefonkamera för att skapa fotogrammetriska 3D-modeller (och beroende på ambitionsnivån kan resultatet bli tillräckligt bra), men det kan aldrig jämföras med en modell som skapats med hjälp av en kalibrerad systemkamera.

Högupplösta bilder tar längre tid för en dator att behandla, men kommer resultera i en mer detaljerad och högupplöst modell. Antalet bilder som tas har också inverkan på den färdiga modellen. Vet man att det inte kommer en ny möjlighet att fotografera objektet man vill göra en 3D-modell av är det bättre att ta för många bilder än att ta för få och sedan ångra sig om resultatet inte blir bra. Den här guiden förutsätter att ambitionsnivån är relativt högt satt och att målsättningen med fotogrammetrin är att dokumentera ett objekt så noggrant att det kan användas för fortsatt forskning. Nedan följer olika steg som kan ingå i processen för att skapa en fotogrammetrimodell och överväganden som hör till varje steg.

2. Att tänka på när man skapar 3D-modeller med fotogrammetri

2.1 Allmänna överväganden

Varje fotogrammetriprojekt bör innehålla dokumentation på projektnivå om projektet, projekttitel, namn på samtliga medverkande, datum och andra användbara anteckningar. För att vara säker på att filerna ska gå att förstå och använda också i framtiden behövs rätt omfattande dokumentation.

2.2 Metoder för fotogrammetri

Kamerakalibrering

Många vanliga digitalkameror har visat sig vara användbara för fotogrammetri, men resultatet skiljer sig åt beroende på modell, val av lins och förinställda inställningar. Man kan tala om *metriska*, respektive *icke-metriska* kameror. Förenklat kan man säga att icke-metriska kameror omfattar i stort sett samtliga digitalkameror (även systemkameror) som kan köpas för privatbruk i en teknikvaruhandel, medan metriska kameror är framtagna speciellt för fotogrammetri och är betydligt dyrare. Metriska kameror är kalibrerade för att ta precisionsfotografier med mindre linsförvrängning än en vanlig kamera. Båda typerna kan med fördel användas för fotogrammetri och oavsett typ av kamera är kamerakalibrering ett obligatoriskt steg för att försäkra sig om att fotografierna som tas är av tillräckligt god kvalitet. Med hjälp av kamerakalibreringen kan man i förväg mäta kamerans interna parametrar och därigenom korrigera distorsioner som förorsakas av linsen (exempelvis att raka linjer kröker sig).

När man tar kort med en kamera omvandlas ljus från en 3D-scen och sparas som en 2D-bild. Varje pixel i bilden kan sägas motsvara en ljusaxel i den riktiga världen. Under kamerakalibreringsprocessen bestäms vilket inkommande ljus som är associerat med vilken pixel. Förvrängningar (eller andra fel) som härrör från linsen kan i värsta fall resultera i snedvridningar och det kommer försvåra processen att transformera 2D-bilderna till en 3D-modell.³ Genom att beräkna parametrarna för lins och bildsensor i

³ http://mixedreality.wikia.com/wiki/Camera_resectioning (2019-10-29)

en kamera kan man korrigera för sådana förvrängningar. I vissa fotogrammetriprojekt används två olika kameror för att skapa en stereobild av ett visst objekt. Då hjälper kamerakalibreringen att samköra de olika kamerornas projiceringsmatriser och beräknar 3D-koordinaterna för en punkt som ses av båda kamerorna. En kamerakalibrering kan utföras automatiskt, semiautomatiskt eller manuellt. Varje kalibrering är unik för en viss kamera- och linskombination och gäller inte för andra kameror eller objektiv. Ändras zoomningen för linsen kommer det krävas en ny kalibrering eftersom de interna parametrarna för kameran har ändrats. Det rekommenderas att hålla ett fast fokus genom både kalibrering och bildtagning. En lista över kamerakalibreringsmetadata finns i avsnitt 3.3 *Kamerametadata*.

Bildinsamling

Om dataskaparen har som målsättning att skapa en 3D-modell behöver objektet fotograferas ur många vinklar. Man bör försäkra sig om att bilderna överlappar till minst 50 % eftersom programvaran som ska bygga modellen letar efter gemensamma nyckelpunkter (ofta hörn och vinklar) i bilderna. För att en punkt ska finnas med i den färdiga 3D-modellen behöver exakt samma punkt finnas synlig i flera bilder (minst två).

Om bildinsamlingsförloppet inte är tillräckligt väldokumenterat riskerar man att personer som inte var med när bilderna togs missförstår hur bilderna hör ihop. Alla uppgifter som gör det enklare att förstå varje bild behöver därför dokumenteras. Exempel på hjälpmedel för att skapa sammanhang är att placera en skalmarkör (till exempel en meterstav eller linjal) eller en norrpil intill det fotograferade objektet. Till det behövs anteckningar om orienteringen av varje bild ("kameran är riktad mot väster"). Om geografisk information behövs för att förstå fotogrammetriobjektet bör det finnas en karta över platsen där objektet är utmärkt och gärna en lista med uppmätta koordinater.

Merparten av alla digitalkameror kan lagra metadata med vad som är känt som EXchangeable Image File Format (Exif)⁴ och nås via många bildbehandlingsprogram (se även avsnitt 3.3 *Bildmetadata*). Exif är en specifikation som bygger på att

⁴ <http://www.fotosidan.se/cldoc/fototeknik/exif-information-i-digitala-bilder.htm> (2019-10-29)

metadainformation lagras tillsammans med filformatet, vilket rent praktiskt innebär att bildfakta registreras och lagras automatiskt i bildfilen för att sedan kunna användas vid exempelvis långtidsbevarande. "Kameratillverkarna sparar också ned de flesta av kamerans inställningar, inklusive modell, version, bildrotation, bländare, slutare, brännvidd, vitbalans, ljusmättningsmetod, iso, om blix avfyrares, avstånd till objektet och allt annat som har med fotoögonblicket att göra" (Rosenqvist 2013)⁵. Tidigare stödde Exif inte formaten JPEG 2000 och PNG, men numera stödjer Exif de flesta av de vanligaste bildfilformaten. Användaren kan själv komplettera Exif med egna metadatas, som namn på upphovsman.

Ett problem med specifikationen är att bildbehandlingsprogram inte alltid hanterar Exif-metadatas korrekt. Om bilden modifieras i ett bildbehandlingsprogram riskerar informationen att förstöras, eller förvrängas. Vissa fotogrammetriprogram (till exempel Agisoft PhotoScan) använder medföljande Exif-metadatas när bilderna ska omvandlas och har då denna information skadats kan det medföra problem för programmet (Bennett 2015). Modifiera därför aldrig någon av originalbilderna. Bättre är att skapa en kopia om man misstänker att man behöver behandla en bild.

Referenssystem, orientering och exakthet

För fotogrammetri är det inte alltid nödvändigt att känna till objektets exakta placering på jordklotet. Hur viktigt det är varierar mellan projekt och beror till stor del på objektet som ska dokumenteras. Exempelvis är det kanske inte nödvändigt att referera objektet till en plats om objektet är en vas eller en figurin. Om objektet däremot är en byggnad och informationen om byggnadens placering bedöms som viktig ska alla insamlade data orienteras i förhållande till ett referenssystem. Antingen i samband med själva bildinsamlingskedet, eller efteråt i en dator. Det finns två skäl till att koppla uppgifter om orientering till ett fotogrammetriprojekt:

1. för att tillhandahålla information om objektets position inom ett referenssystem och/eller

⁵ <http://www.kamerabild.se/fotoskolor/vi-f-rklarar/vi-f-rklarar-metadatas-och-exif-informationen-bakom-bilden> (2019-10-29)

2. för att sätta geometriska avgränsningar för fotogrammetrimodellen.

SWEREF 99 är det officiella referenssystemet som används i Sverige. SWEREF 99 är ett (geodetiskt) tredimensionellt referenssystem. Att det är tredimensionellt kan medföra svårigheter och för att undvika alltför stora felmarginaler så finns den tvådimensionella, nationella kartprojektionerna SWEREF 99 TM som gäller för tillämpningar på nationell nivå. För tillämpningar på lokal nivå finns också tolv lokala projektionszoner⁶ att tillgå.

Vill man kunna bestämma det fotograferade objektets position så krävs det att tillräckligt med inmätta referenspunkter integreras i projektet. Referensinformationen kan vara i form av kontrollpunkter (fotoidentifierbara punkter med kända koordinater⁷), utplacerade fotoidentifierbara objekt (exempelvis schackrutiga pappersark), och/eller fotoidentifierbara vinklar.

Eftersom fotogrammetrimodeller saknar skalinformation, måste dataskaparen själv definiera skalan så att modellens storlek går att fastställa. Detta kan ske på olika sätt.

Vanliga tillvägagångssätt är:

- En linjal eller stav med känd längd (till exempel en meterstav) placeras framför/bredvid modellen.
- Att man för två eller flera fotografier har mätt längden på objektet.
- Man utgår från objektets förhållande till två kända kontrollpunkter (då kan avståndet mätas mellan dessa).

En skalindikator kan infogas för att kunna bestämma skalan mer exakt. Om sådan referensinformation används bör detta finnas dokumenterat tillsammans med medföljande metadata. Graden av noggrannhet avgör hur exakt skalinformationen för fotogrammetrimodellen blir, men påverkar inte modellens form.

För att fotogrammetrimodellens orientering ska kunna bestämmas inom det valda referenssystemet behövs minst två kända 3D-kontrollpunkter (kontrollpunkter med både X, Y och Z-värde) och en kontrollpunkt med åtminstone en känd koordinat (X, Y

⁶ <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/Referenssystem/Tvadimensionella-system/SWEREF-99-projektioner/> (2019-10-29)

⁷ Antingen kan dataskaparen välja sina egna kontrollpunkter, eller så används någon av Lantmäteriets sedan tidigare uppmätta punkter.

eller Z). Kontrollpunkter är identifieringsmärken med kända koordinater som antingen finns direkt på, eller intill objektet som ska dokumenteras. Att välja lämpliga kontrollpunkter både förenklar arbetsprocessen och ger mer exakta resultat (Wenhao 2001), vilket är avgörande om modellen ska användas tillsammans med GIS-data. Referensinformationen kan också vara i form av observationer med något lägre exakthet (till exempel egna kontrollpunkter som har samlats in genom inmätning med GPS⁸) så länge inte krav finns på högre precision. Om bara två GPS-inmätta kontrollpunkter används (med 1-meters noggrannhet) tillsammans med ett känt höjdvärde kan skalan för modellen bestämmas genom det beräknade avståndet mellan GPS-punkterna. Positionen skulle också kunna bestämmas baserat på de två kontrollpunkterna tillsammans med höjdvärdet. Tillhandahålls bara minimal referensinformation (det vill säga två 3D-kontrollpunkter och en 1D-kontrollpunkt), bortsett från skalinformation, kommer det bara ha effekt på fotogrammetrimodellens position och orientering inom det valda referenssystemet. Riktigheten beträffande avstånd, vinklar och form på 3D-modellen bestäms fortfarande helt av de fotografier som samlas in. Skulle mer än minimal referensinformation ges (tre eller fler 3D-kontrollpunkter) kan informationen också användas för att definiera formen på fotogrammetrimodellen. Är detta målsättningen måste dataskaparen försäkra sig om att referensinformationen har minst 3 gånger högre lägesnoggrannhet än själva fotogrammetrimodellen. I annat fall finns risk att referensinformationen kommer förvränga modellen. I praktiken innebär det att om den interna precisionen hos en fotogrammetrimodell är i skala 1:1000, så bör referensinformationen vara korrekt till minst 1:3000.

I projekt där referensinformation har integrerats i fotogrammetrimodellen bör relevanta metadata dokumenteras och deponeras tillsammans med tillhörande data (se även avsnitt 3.3 *Metadata för referenssystem*) för långtidsbevarande.

Bildbehandling

I vissa fall krävs någon form av digital efterbehandling av fotografierna. Bildbehandling omfattar alla former av justeringar av ljusstyrka, färg, kontrast, skärpa och så vidare. Man bör, som nämndes i avsnittet 2.2 *Bildinsamling* (se ovan), ha i åtanke att många

⁸ <https://pos.agrovast.se/precisionsskolan/positionering/> (2019-10-29)

bildbehandlingsprogram kan förvränga den Exif-data som hör till bilden och att detta kan försvåra processen att omvandla 2D till 3D. Därför bör man noga överväga om bildredigering verkligen behövs. Om det anses nödvändigt bör en obearbetad originalversion sparas/arkiveras. Vad som är viktigt att poängtera är att en bild som ska användas för fotogrammetri **aldrig** får beskäras.

Det kan ibland också vara nödvändigt att konvertera en digital bild från ett format till ett annat. Originalbilderna bör då sparas i ursprungligt, oredigerat skick och lagras separat. Om kameran som används är inställd på att ta bilder i ett eget RAW-format, bör dessa konverteras till ett arkivformat innan inlämning till långtidslagring (exempelvis Nikon RAW .nef kan konverteras till Adobes .dng med Adobe DNG Converter). Namnet "Raw" kommer från att bildfiler i RAW-format är helt obearbetade och är därför inte redo för att redigeras i en bildbehandlare eller skrivs ut. På grund av bristen på standardisering och den stora mängden RAW-format är det nästan omöjligt att karakterisera en RAW-fil. Många filer är okomprimerade, medan andra kan använda sig av både destruktiv eller förlustfri komprimering (och en del tillåter användaren att välja själv). Bristen på standardisering medför också att många filer kräver särskild programvara för att filerna ska kunna läsas. RAW-bildfiler kallas ibland för digitala negativ, i och med att de fyller samma roll som negativen vid analog fotografering. Det vill säga, negativet är inte direkt användbart som bild, men det innehåller all information som krävs för att skapa en bild och bildkvaliteten riskerar inte att försämrans om det görs justeringar i exempelvis vitbalans eller exponering. För tillgängliggörande och långtidsbevarande rekommenderas inte att filer sparas i RAW-format, men se till att dokumentera alla bildformatskonverteringar och vilken programvara som använts för att utföra konverteringen eftersom dessa kan ha inverkan på bildkvaliteten.

Hur en tredimensionell fotogrammetrimodell skapas

I exemplet nedan har en enklare 3D-rekonstruktion av en leksakshund gjorts med hjälp av SfM. 3D-modellen genererades av ca 200 bilder som togs med en vanlig mobilkamera. Modellen ska inte ses som ett föredöme för hur en fotogrammetrisk 3D-modell bör skapas (snarare det motsatta), men används här som ett pedagogiskt verktyg för att illustrera olika stadier som kan ingå när en 3D-modell genereras. Att det

står "kan" beror på att processen kan skilja sig mellan olika program. Modellen i exemplet har genererats i Agisoft Photo Scan.

Steg 1: Bildjustering

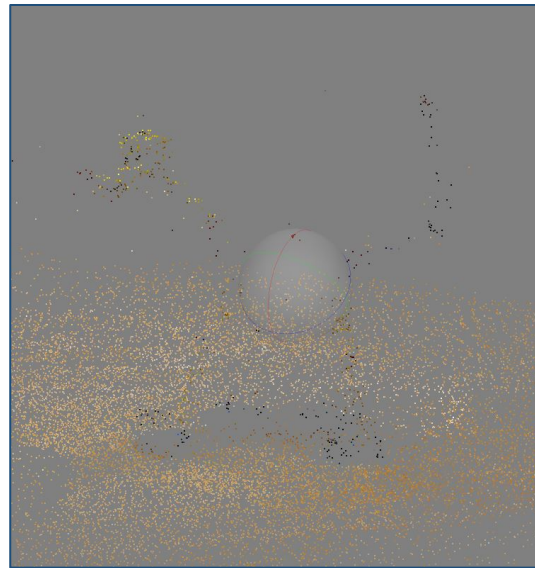
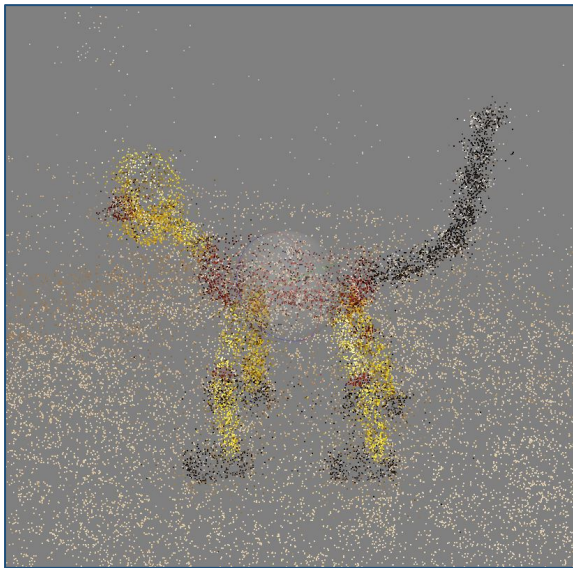
Bildjusteringen är det steg där fotografierna laddas upp till fotogrammetriprogrammet och transformeras från 2D till 3D. Bilderna behöver överlappa varandra till minst 50 %. Programmet söker efter gemensamma punkter och spårar framträdande geometriska element, som hörn och vinklar. När motsvarande punkt har hittats i två eller fler av bilderna jämför programmet färg och textur i det absoluta närområdet runt varje punkt och hämtar ett medelvärde. Kamerans olika positioner i förhållande till det fotograferade objektet är viktig. Både för att gemensamma punkter ska kunna hittas, men också för att programmet beräknar djupinformation för varje punkt baserat på de uppskattade kamerapositionerna. Detta är en av grundförutsättningarna för att transformationen från 2D till 3D ska vara möjlig. Mätvärden om avståndsförhållandet till kamerorna och färginformation kombineras till ett tredimensionellt punktmoln där varje punkt representerar genomsnittsvärdet för de spårade punkterna. Ju fler gemensamma punkter som hittas, desto bättre är förutsättningarna för en god 3D-rekonstruktion. Felaktig bildjustering där programmet inte hittar gemensamma punkter är vanligtvis ett resultat av dålig överlappning, objektet är inte i fokus, mängden texturdetaljer på objektytan är otillräcklig eller att ljuset är för dåligt (till exempel för stor kontrast mellan högdager och skugga).

På nästa sida ser man hur det första punktmolnet kom att se ut för leksakshunden.

Figur 2 genererades av ca 200 bilder och formen på objektet går att avläsa någorlunda, men i "luften" runt objektet svävar punkter (brus) som inte hör till objektet.

Mobilkameran som användes lyckades inte alltid fokusera på hunden och till viss del beror nog bruset på att fokus har varit på olika områden i bilderna. Ytterligare försvårande omständigheter var att hunden hade många släta, enfärgade ytor och att ytan var glansig (se *Figur 9*). Vissa applikationer kan reducera brus automatiskt, men här redigerades punkterna bort manuellt innan nästa steg togs. Som en jämförelse så genererades *Figur 3* av enbart 30 bilder. Det var ett alldeles för tunt underlag för det här objektet med den kamera som användes. Resultatet var att programmet knappt hittade

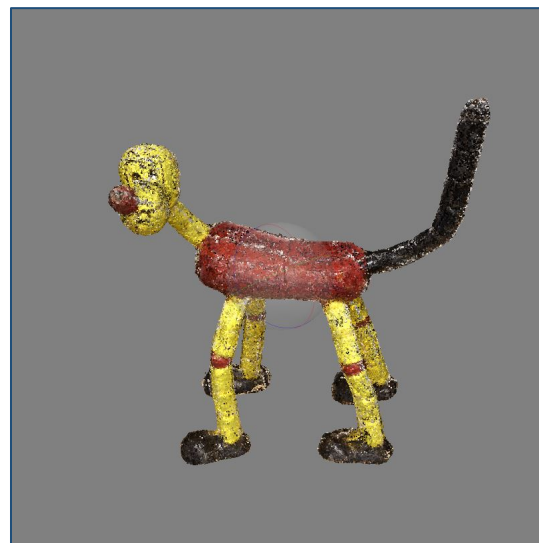
tillräckligt med gemensamma punkter för att det ska gå att gissa sig till vad det är för form på objektet.



Figur 2-3: Figur 2 (t.v.) visar punktmolnet som genererades utifrån 200 bilder. Figur 3 (t.h.) visar samma objekt, men den här gången användes endast 30 bilder.

Steg 2: Kompakt punktmoln

I nästa steg förtätas punktmolnet. Ett punktmoln är huvudsakligen en stor samling punkter som placeras i en 3D-rymd utifrån ett godtyckligt tredimensionellt koordinatsystem. Att generera det kompakta punktmolnet är sannolikt det mest tidskrävande momentet. Det är också först nu man får en första föräning om hur 3D-modellen i slutändan kommer att se ut. Finns det hålrum så har applikationen inte hittat några gemensamma punkter i det området och det är ett problem

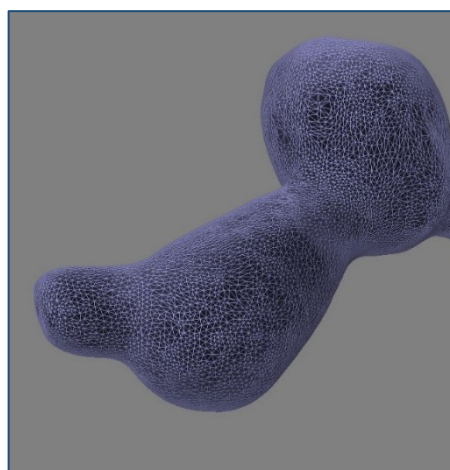


Figur 4: Leksakshunden har flera små hål i kroppen (bland annat i ansiktet), vilket visar att programmet inte har hittat referenspunkter just där.

som i viss omfattning också kommer finnas kvar i slutprodukten. Har man tur kan texturen från fotografierna dölja bristerna i geometrin, men det är fördelaktigt om det kompakta punktmolnet är jämt fördelat över hela modellen och ger intrycket av en solid modell. Det ska helst inte finnas några luckor eller deformerade områden.

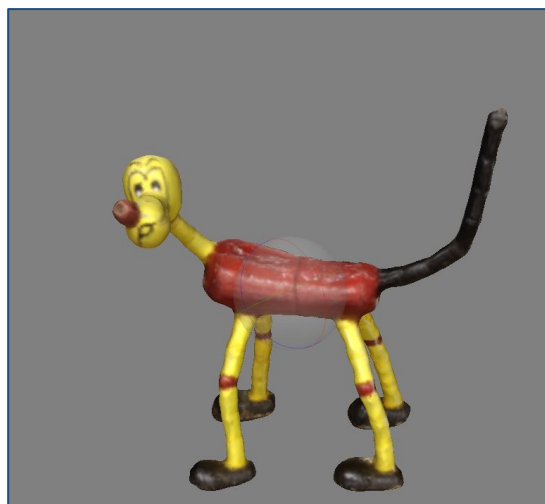
Steg 3: Från punktmoln till mesh

Efter att det kompakta punktmolnet har genererats är det möjligt att skapa en vertexbaserad⁹ meshmodell. En meshmodell är uppbyggd av ett nät av polygoner som baserats på det kompakta punktmolnet. I det här stadiet beskrivs föremålets geometri genom att ytan delas in i ett nät av triangulära polygoner som antingen är ihåliga (se *Figur 5*) eller ifyllda. Det här steget kan liknas vid en tredimensionell variant av pysselboksmomentet där man drar streck mellan prickar och ser en bild växa fram.



Figur 5: En närbild på hur meshmodellen ser ut efter att programmet har genererat polygoner av punktmolnet.

För *Figur 6-7* har polygonerna fyllts igen. Modellen visas här antingen i en neutral färg, eller så hämtas RGB-information från fotografierna. RGB-information är inte detsamma som att texturinformation har hämtats. Här avslöjas ännu tydligare om det finns några brister i geometrin. Fotogrammetriprogram kan i varierande omfattning rätta till sådana brister i efterhand. Det kan vara möjligt att rätta till ojämnheter och fylla i hål manuellt, men det är bäst om tillräckligt med överlappande bilder finns så att hålrum, eller andra



Figur 6-7: Här visas två versioner av modellen där polygonerna är ifyllda. Det går att se att geometrin fortfarande har en del brister.

⁹ Vertex betyder "topp", "hörn" eller "hjäss" och beskriver den punkt där två sidor i en polygon möts, det vill säga hörnet på polygonen. Vertexbaserade modeller använder plana polygoner, trianglar eller rektanglar, för att representera rundade former.

fövrängningar av geometrin, kan rättas till automatiskt. Programmet kan också ha skapat fler polygoner än vad som är nödvändigt och då finns olika program för polygonreducering som kan hjälpa till att minska ner polygonantalet.

Steg 4: Textur

I det här steget kan man hämta texturinformation från fotografierna och applicera på modellen. Om tidigare steg har lyckats är det nu 3D-modellen får ett fotorealistiskt utseende. Ytterligare steg kan tillkomma som manuella justeringar, animationer, motion-capture och så vidare, men generellt sett kan man säga att det här steget är det sista som färdigställer 3D-rekonstruktionen.



Figur 8-9: Figur 8 visar det färdiga resultatet med textur hämtad från fotografierna. De automatiska inställningarna har valts. Figur 9 visar ett av originalfotografierna som användes.

3. Långtidslagring av fotogrammetridata

3.1 Vilka filer skall bevaras?

Till skillnad från många andra datatyper så skapas förhållandevis stora mängder data för ett fotogrammetriprojekt. Data som lämnas in för långtidsbevarande kommer som minst att bestå av en uppsättning fotografier med tillhörande metadata. Utöver fotografierna kan det tillkomma kamerakalibreringsdata, matriser av olika slag, koordinater, filer som fångat olika stadier i fotogrammetriflödet och en projektfil med den färdiga modellen.

3.2 Hur ska det bevaras?

Vanligtvis samlar fotogrammetriprogram alla relaterade data i en projektfil. Projektfilen kan innehålla en lista över samtliga uppladdade fotografier, de lager och masker som har applicerats på fotografierna, information om var kameran (eller kamerorna) befinner sig i förhållande till det fotograferade objektet, kompakta punktmoln, meshmodeller (med eventuella manuella inställningar gjorda av användaren) och texturrekonstruktioner (Bennett 2015). Fotogrammetriska projektfiler är ofta i proprietära¹⁰ format och lämpar sig inte för långtidsbevarande. Om programmet har en exportfunktion, är det en god idé att omvandla data till lämpliga arkivformat i samma program där de ursprungligen skapades. Om detta inte är möjligt, till exempel om det önskade formatet inte stöds av den ursprungliga programvaran, kan data behöva konverteras till ett mellanliggande format som sedan kan konverteras till målformatet med hjälp av ytterligare programvara. Det är lämpligt att långtidsbevара bland annat punktmoln och ofärdiga meshmodeller som separata filer eftersom det ger bättre förutsättningar till återanvändning i framtiden.

Viktiga egenskaper

När man ska besluta vilka filer som ska användas för långtidsbevarande så är det rekommenderat att välja ett format som bevarar viktiga egenskaper i filen samtidigt som formatet bör vara vanligt förekommande. Vanliga filformat brukar gå att öppna i

¹⁰ Proprietärt filformat är filformat som har restriktioner (vanligtvis satta av ägaren) vad gäller att använda, modifiera eller kopiera.

flera olika program och det ökar chanserna att filformatet kommer kunna läsas i framtiden. I likhet med vissa andra datatyper är textbaserade filformat de mest stabila formaten för att långtidsbevara fotogrammetriska 3D-data. Dataskaparen bör, om det är möjligt, välja öppna och väldokumenterade format som tillåter åtkomst till data oberoende av specifika program.

Eftersom man för fotogrammetri inte kan tala om en enskild fil med en viss uppsättning egenskaper så listas här data som bör lämnas in för långtidsbevarande.

- **Fotografier** – Gäller både ursprungsbilder och bilder som på något vis har bearbetats i syfte att användas för fotogrammetri.
- **Punktmoln** – Eftersom punktmoln kan bearbetas och återanvändas så bör en fil med punktmolnet också lämnas till långtidsbevarande.
- **Kalibreringsbilder** – Har kalibrering av kamerans inre parametrar gjorts bör kalibreringsbilder och tillhörande metadata lämnas till långtidsbevarande.
- **Referensinformation och annan matrisinformation** – I de fall då fotogrammetrimodellen har spatial referensinformation behöver koordinater, kontrollpunkter och annan dokumentation bevaras.
- **Den färdiga 3D-modellen, med eller utan texturinformation** – Det är inte nödvändigt, men eftersom meshmodellen kan sägas representera den färdiga tredimensionella rekonstruktionen är det önskvärt om också denna bevaras. Gärna med texturen från fotografierna.

För att fotogrammetridata ska kunna återanvändas behöver åtminstone fotografierna lämnas till långtidsbevarande. Övriga datatyper är också användbara, men fotografierna är en förutsättning för att det ska gå att generera en helt ny modell. Det är även önskvärt om punktmoln lämnas till långtidsbevarande för det sparar tid och förenklar processen att generera modellen på nytt. Med tanke på den snabba utvecklingen av 3D-program är det rekommenderat att samtliga grundläggande källdata, som successivt byggts på under projektet, bevaras för att kunna användas och redigeras i framtida applikationer (Bennett 2015). Även projektfilen med den färdiga modellen kan lämnas in till långtidsbevarande, men då bör man ta reda på om data går att nå via projektfilen. Ofta länkar projektfilen till data som ligger lagrade någon annanstans och om inte

sökvägen är rätt så kommer det inte gå att nå data. I sådana lägen fyller projektfilen ingen funktion för en sekundäranvändare.

Rekommenderade filformat

Många tillgängliga filformat är proprietära. Det har till följd att dataskaparen inte alltid kan välja filformat, utan måste använda något av de format som tillhör det program som används. Det kan också försvåra migreringar mellan olika format. För majoriteten av 3D-modeller (också sådana som inte skapats genom fotogrammetri) är OBJ- och PLY-formaten de som har bäst förutsättningar att bevara geometrier och visuella ytegenskaper hos 3D-objekt, men de lämpar sig inte för mer komplexa scener som kräver ljuskällor, eller komplex interaktivitet.

De filformat som beskrivs nedan är de som rekommenderas för bevarandet av fotogrammetridata (gäller inte rasterbilder):

Format	Beskrivning
AutoCAD DXF (.dxf)	Endast lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande om data ursprungligen har skapats i CAD. ASCII-versionen av formatet föredras för bevarande.
COLLADA (.dae)	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande för meshmodeller, men rekommenderas bara där X3D-formatet inte är tillgängligt.
CSV (.txt, .csv)	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln.
Stanford PLY (.ply)	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln och meshmodeller, men rekommenderas bara där X3D-formatet inte är tillgängligt. ASCII-versionen av formatet föredras för bevarande.
Universal 3D Format (.u3d)	Lämpligt för långtidsbevarande av meshmodeller, men rekommenderas endast där X3D-formatet inte är tillgängligt.
VRML (.vrmf)	Lämpligt för långtidsbevarande av meshmodeller, men rekommenderas endast där X3D-formatet inte är tillgängligt.

X3D (.x3d)	Rekommenderas för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln och meshmodeller.
Wavefront OBJ (.obj)	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln och meshmodeller. ASCII-versionen av formatet föredras för bevarande.

3.3 Metadata och dokumentation

Utöver metadata som beskriver själva projektet (till exempel kontaktuppgifter till projektledaren, en länk till en webbsida, upphovsrättsinformation och liknande) behöver data skickas med metadata som hör till fotografierna, till kameran, till den färdiga modellen och så vidare.

Detaljnivån som krävs för att dokumentera hela arbetsflödet i sin fullständighet varierar beroende på syftet med projektet, komplexiteten hos slutprodukten och den teknik som använts för att generera det färdiga resultatet. En del filformat tillåter att vissa metadata lagras i själva filen, fast se till att metadata också lagras separat och deponeras i en egen fil så att element i den färdiga produkten kan kontrolleras mot filens innehåll.

De metadataelement som listas nedan beskriver huvudsakligen tekniska uppgifter.

Bildmetadata

Det rekommenderas att fotografierna som använts i fotogrammetriprojektet åtföljs av åtminstone två kategorier av metadata: 1) bildmetadata och 2) kamerametadata.

Egenskaper	Beskrivning
För varje set av bilder	
Projektnamn	Projektets titel och eventuell förkortning eller alternativ titel.
Antal bilder	Det totala antalet bilder som lämnats in för bevarande.

Kameraspecifikationer	Märke och modell på kamera och objektiv som har använts.
Filnamn för planimetrisk skiss eller karta	Filnamn och filändelse. Bör omfatta beskrivning av objektet och andra omgivande objekt (om det finns några), position och orientering för varje bild, och ytterligare kommentarer och/eller observationer.
Kamerakalibreringsfil	Detaljer om kamerakalibrering finns under avsnittet <i>Kamerametadata - Kamerakalibrering</i> .
Kompletterande anteckningar	Eventuella kompletterande anteckningar som kan vara användbara för en sekundäranvändare.
För varje enskild bild	
Bildfilnamn	Filnamn och filändelse.
Beskrivning av plats och orientering	Bör beskriva platsen i generella drag och kamerans förhållande till objektet (till exempel "kameran är riktad mot söder").
Formatkonverteringar (om några har gjorts)	Lista över eventuella förändringar av format för de digitala bilderna och information om vilken programvara som har använts.

Kamerametadata

Kamerakalibrering

För projekt med högre noggrannhetskrav är kamerakalibrering ett nödvändigt moment. I tabellerna nedan anges de metadata som gäller för kamerakalibrering och innefattar dokumentation av kamerans interna parametrar.

Egenskaper	Beskrivning
Datum för kalibrering	Datumet då kalibreringen gjordes.
Filnamn, kamerakalibreringsfil	Det exakta filnamnet för kamerakalibreringsfilen.

Kameraspecifikationer	Märke och modell på kamera och objektiv som använts.
Bildsensorstorlek i pixlar¹¹	Bredd och höjd på bildsensorer, mätt i pixlar.
Bildsensorstorlek i millimeter	Bredd och höjd på bildsensorer, mätt i millimeter.
Brännvidd och principalpunkt¹²	Den exakta brännvidden (eller fokallängden), principalpunktens läge och hur detta mäts under kamerakalibreringen.
Linsförvrängningar (parametrarna K1, K2, K3, P1 och P2)	Radiella och decentrerade distorsionsparametrar uppmätta under kamerakalibreringen. Anges som: K1, K2, K3, P1 och P2.
Affina distorsioner	Affina distorsionsparametrar uppmätta under kamerakalibreringen (om detta är gjort).
Kvalitetsvärden	Kvalitetsvärden som övergripande RMS ¹³ , maximum residual ¹⁴ och photo coverage ¹⁵ (anges i %) från kalibreringsprocessen.
Lista med information om kalibreringsjusteringar	En rapport/lista med information om kvaliteten på kamerakalibreringen, inklusive korrelationen mellan externa och interna parametrar.

¹¹ Storleken på de individuella pixlarna tillsammans med bildsensorns upplösning avgör till stor del hur bildkvaliteten blir. Generellt kan man säga att en större pixel samlar in mer ljus och ger mindre brus i bildåtergivningen än en mindre pixel. Speciellt i svagt ljus är det därför fördelaktigt med en större pixelstorlek. Antalet pixlar i en bildsensor avgör bildsensorns upplösning av bilden. Storleken på de individuella pixlarna och antalet pixlar bestämmer storleken på bildsensorn.

¹² Principalpunkt avser den punkt där den optiska axeln skär principalplanet. Principalplanet ligger vinkelrätt mot axeln för en lins.

¹³ Root-mean-squarevärde (RMS) för grynighet.

¹⁴ *Residual* är felvärdet angett i pixlar mellan där en punkt finns markerad (antingen av användaren själv, eller automatiskt) på en 2D-bild och där 3D-punkten som är associerad med den markerade punkten hamnar vid jämförelser med 2D-bilden. *Maximum residual* är den det maximala felvärdet för alla markerade punkter i projektet. Ett projekt med höga kvalitetskrav bör normalt ha ett maximum residualvärde under 1,0 pixel (även om det finns undantag där ett högre värde kan godtas).

¹⁵ I vilken utsträckning ett område täcks in av fotografierna i en serie av bilder.

Kalibreringsbilder

Egenskaper	Beskrivning
Namn på bildfiler	Filnamn på kalibreringsbildfiler.
Beskrivning av målet för kalibrering	Inkluderar dimensioner för målet, vem som är skapare och en beskrivning.

Metadata för referenssystem

Ingår geografisk referensinformation i projektet behöver metadata anges för kontrollpunkterna.

Egenskaper	Beskrivning
För varje kontrollpunkt	
Utrustning och referenssystem	Ange källan (exempelvis totalstation eller GPS och WGS84, UTM, LRF) för insamling av kontrollpunkter och aktuellt referenssystem. Märke och modell på utrustning som använts bör också specificeras.
XYZ-koordinater	Lista de tredimensionella koordinaterna för varje kontrollpunkt.
XYZ-kovariansmatris	Om kovariansmatris finns anges fullständig korrelation, annars anges beräknad standardavvikelse eller varians för varje koordinat.
Beskrivning av platsen	Ge en kort fritextbeskrivning av platsen där varje kontrollpunkt är placerad.
Bild över platsen där kontrollpunkten är placerad	En bild där man tydligt ser hur kontrollpunkten ligger i förhållande till andra kända företeelser.
Geometriska begränsningar ¹⁶ för referensinformation	Lista alla kända geometriska begränsningar (om det finns några).
Koordinatsystem	Namn på koordinatsystem, referenssystem och projektion.

¹⁶ Geometriska begränsningar (geometric constraints på engelska) innebär att bildmatchingsproblem löses genom att volymen av möjliga lösningar begränsas.

Modellmetadata

Bearbetats bilderna med fotogrammetriprogramvara och detta resulterar i en 3D-modell (inklusive punktmoln och 3D-meshmodeller) som ska arkiveras, ska metadata i enlighet med dessa filtyper också ingå. Följande poster kan skrivas in individuellt eller finnas beskrivna i en textfil.

Egenskaper	Beskrivning
Namn och version av mjukvara	Inkluderar alla detaljer om programvarans namn, tillverkare och den version som använts.
RMSE-värden ¹⁷	Root mean square error (RMSE). Ange standardavvikelse för inmätta kontrollpunkter.
Begränsningar av objektpunkter	Lista över begränsningar som använts under bearbetning.
För varje punkt:	
Typ av punkt	Knytpunkt ¹⁸ , kontrollpunkt eller checkpoint.
Kovariansmatris a priori	Ange kovariansmatris (om sådan finns tillgänglig) för punkter innan hopslagning av bilder.
Bildkoordinater och felvärden (residuals)	En lista över de bilder där en punkt finns med. För varje bild anges koordinater och felvärden.
XYZ före och efter	XYZ-koordinater före och efter blockutjämning (bundle adjustments ¹⁹). Gäller kontrollpunkter och checkpoints.
För varje bild:	
Yttre orientering	Lista yttre orienteringsparametrar för varje bild.

¹⁷ RMSE är ett mått på spridningen av avvikelserna, till exempel när en jämförelse görs mot ett givet värde, eller som ett mått på medelvärdet av standardavvikelserna eller standardfelen.

¹⁸ Knytpunkten är en punkt som saknar kända markkoordinater, men kan kännas igen visuellt i överlappningsområdet mellan två eller flera bilder.

¹⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Bundle_adjustment (2019-10-29)

4. Filformat

När fotogrammetridata ska långtidsbevaras bör de ursprungliga fotografierna lagras tillsammans med övriga data. Det finns flera olika filformat som lämpar sig för långtidsbevarande av rasterbilder, men dessa kommer inte att listas här. Se istället SND:s guide *Rasterbilder: En guide till god hantering* som ger information om vad man bör tänka på när rasterbilder ska framtids säkras och vilka format som är lämpliga att använda.

I tabellerna beskrivs några vanliga filformat för fotogrammetridata och vilka av dessa som rekommenderas för långsiktigt bevarande:

AutoCAD DXF	
Filformat/-ändelse	DXF/.dxf
Format	Autodesk Drawing Interchange Format (DXF) är ett CAD-dataformat som har utvecklats av Autodesk för att möjliggöra överföring av data mellan AutoCAD och andra program.
Beskrivning	Autodesk DXF-format är främst ett CAD-överföringsformat och är kompatibelt mellan CAD och bland annat GIS. Få applikationer stödjer formatet. DXF bör endast användas för 3D-innehåll skapat med hjälp av CAD-programvara. DXF har genomgått många revisioner och uppdateringar sedan det först utvecklades 1982 och formatkapaciteten har utvecklats med tiden. Formatet kan användas för vissa data i ett fotogrammetriprojekt.
Rekommendationer	Endast lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande om data ursprungligen har skapats i CAD. ASCII-formatet föredras för bevarande.

Autodesk FBX asset exchange format	
Filformat/-ändelse	FBX/.fbx
Format	FBX (tidigare Filmbox) är ett proprietärt filformat som har utvecklats av Kaydara och som sedan 2006 ägs av Autodesk.

Beskrivning	FBX är ett av de mest populära och välanvända 3D-filformaten och hanterar både 2D och 3D. Formatet stödjer bland annat geometrier, färg och textur och animationer. FBX är vanligt förekommande bland film- och spelutvecklare. Formatet stöds av flertalet 3D-applikationer och kan konverteras till bland annat .obj, .dxf, .3ds, och .dae. FBX finns både som en binär och som en ASCII-baserad version. Det har aldrig publicerats någon officiell specifikation för formatet. FBX är ett utbytesformat.
Rekommendationer	Fungerar för tillgängliggörande av meshmodeller, men rekommenderas endast om ASCII-versionen väljs och i fall där X3D-formatet inte är tillgängligt.

COLLADA	
Filformat/-ändelse	COLLADA ²⁰ .dae
Format	COLLADA (COLLaborative Design Activity) utvecklats av det icke-vinstdrivande Khronos Group-konsortiet och är en ISO-standard (ISO/PAS 17506:2012).
Beskrivning	COLLADA är ett öppet XML-baserat format som har utformats för att fungera som ett utbytesformat för komplexa 3D-data. Formatet stödjer icke-destruktiv komprimering och kan användas som utbytersformat utan att man riskerar förlust av information. COLLADA stödjer geometrier (B-rep ²¹), animation, verklighetstrogen fysik och skuggning och är därför ett format som lämpar sig för lagring av färdiga fotogrammetrimodeller.
Rekommendationer	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande för både meshmodeller, men rekommenderas endast där X3D-formatet inte är tillgängligt.

²⁰ <https://www.khronos.org/collada/> (2019-10-29)

²¹ B-repmodeller genererar 3D-objekt genom att beskriva objektets olika indelade begränsningsytor. B-repmodeller kan generera komplexa objekt, men som ett resultat kan datastrukturen vara minneskrävande.

CSV

Filformat/-ändelse	CSV/.txt, .csv
Format	CSV (Comma-separated values) är ett allmänt, vanligt format som lagrar tabelldata (tal och text) i vanlig text.
Beskrivning	<p>CSV är ett textfilformat som används för att lagra textinformation i en databastabell med ASCII. Textfiler kan lagra data i en databastabell där cellernas innehåll särskiljs med en avgränsare som kommatecken, semikolon, mellanslag, tabb och vertikalstreck (). CSV kan användas vid överföring av data mellan program som har olika filformatsstandarder.</p> <p>CSV saknar en specifikation och det är lätt att hitta skillnader mellan olika CSV-format. Mjukvara, system och lokala inställningar påverkar hur CSV-exporten av en databas eller ett kalkylblad kommer att se ut.</p>
Rekommendationer	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln.

PDF/A (3D PDF)

Filformat/-ändelse	PDF/A-1 /.pdf-1a
Format	PDF (Portable Document Format), skapat av Adobe, är i huvudsak en öppen standard för överföring mellan olika system. Formatet finns ett antal varianter, däribland PDF/A-1.
Beskrivning	<p>Även om PDF/A-1 är ett proprietärt och binärt format så fungerar det bra för att tillgängliggöra material då det är designat för att bibehålla formatet på ursprungsdokumentet. Formatet kan förutom att visa upp vanlig text även innehålla ett stort antal olika infogade filformat eller länkade media inklusive raster- och vektorgrafik, JavaScript och 3D-objekt. PDF-filer kan skyddas så att det inte går att redigera alternativt att skriva ut dokumentet.</p> <p>För 3D-data finns en hel del begränsningar. PDF/A-1 kan bara användas för att visa upp färdiga 3D-modeller och formatet tillåter inte en sekundäranvändare att bearbeta 3D-data (till exempel endast punktmoln).</p>

Rekommendationer	PDF/A-1 har blivit accepterat som ett fungerande format för långtidsbevarande (bland annat av Library of Congress ²² samt Riksarkivet). Formatet lämpar sig inte för långtidsbevarande av 3D-modeller, men beroende på syfte kan det användas för tillgängliggörande.
-------------------------	--

Stanford PLY

Filformat/-ändelse	PLY/.ply
Format	Polygon file format (PLY) ²³ utvecklades av Greg Turk på Stanford University på 1990-talet.
Beskrivning	PLY finns både som ett ASCII-baserat format och som ett binärt format. PLY lagrar egenskaper som bland annat textur (till exempel från fotografier), färg, transparens och xyz-värden (höjd, bredd och djup). För mycket komplexa 3D-dataset och visualiseringar är COLLADA- och X3D-formaten att föredra, men i de flesta fallen är PLY ett fullgott format.
Rekommendationer	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln och meshmodeller, men rekommenderas endast där X3D-formatet inte är tillgängligt. ASCII-formatet föredras för bevarande.

Universal 3D Format (U3D)

Filformat/-ändelse	U3D/.u3d
Format	U3D utvecklades av ett konsortium som heter 3D Industry Forum och är ett standardformat (ECMA-363) ²⁴ .
Beskrivning	U3D är ett komprimerat överföringsformat som har en öppen specifikation och lagrar bland annat vertexbaserad geometri, färg och textur. Den senaste versionen av formatet stödjer även kurvade ytor.

²² <http://www.digitalpreservation.gov/formats/fdd/fdd000125.shtml> (2019-01-03)

²³ <http://paulbourke.net/dataformats/ply/> (2019-10-29)

²⁴ <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-363.htm> (2019-10-29)

	Formatet stöds av flertalet applikationer. PDF använder U3D för att bädda in 3D-objekt i pdf-filer.
Rekommendationer	Lämpligt för långtidsbevarande av meshmodeller, men rekommenderas endast där X3D-formatet inte är tillgängligt.

VRML

Filformat/-ändelse	VRML/.vrmf
Format	VRML (Virtual Reality Modelling Language ²⁵) är ett filformat som används för att representera tredimensionell (3D) interaktiv vektorgrafik.
Beskrivning	VRML är en textbaserad standard (ISO/IEC 14772-1:1997) speciellt framtagen för Internet för att representera 3D-interaktiv vektorgrafik och är föregångaren till X3D. Den senaste versionen publicerades 1997 som VRML 2.0/97. Formatet stödjer bland annat animationer, transparens och yttre ljuskällor.
Rekommendationer	Lämpligt för långtidsbevarande av meshmodeller, men rekommenderas endast där X3D-formatet inte är tillgängligt.

X3D

Filformat/-ändelse	X3D/.x3d
Format	X3D är ett ISO-standardiserat (ISO/IEC 19775-1:2008) XML-baserat format utvecklat av Web3D-konsortiet.
Beskrivning	X3D-formatet (extensible 3D graphics) har varit en ISO-standard sedan 2006. X3D är ett öppet format som används av ett antal 3D-modelleringsprogram med öppen källkod. Polygonala modeller lagrade i X3D kan lagra geometri (NURBS ²⁶), texturer, animationer, yttre ljuskällor och ett antal andra funktioner som används för återgivning. Formatet är lämpligt för lagring av både fristående 3D-modeller, såväl

²⁵ <http://www.web3d.org/standards> (2019-10-29)

²⁶ NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) geometrier bestäms av ett antal fasta kontrollpunkter. Kontrollpunkterna är antingen anslutna direkt till ytan på objektet, eller "svävar" utanför modellen och uppträder som om de var fastsatta vid figuren med gummiband. NURBS tillåter konkava och konvexa polygoner.

	som mer komplext 3D-innehåll som virtuell verklighet (VR). Formatet liknar föregångaren VRML, men X3D är att föredra. X3D har fler funktioner och är ett modernare format. Formatet är kärnan till 3D i HTML5. X3D liknar OBJ.
Rekommendationer	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln och meshmodeller.

Wavefront OBJ

Filformat/-ändelse	OBJ/.obj (.mtl, .jpg)
Format	Wavefront OBJ file utvecklades av Wavefront Technologies och är ett öppet format som har en stor användargrupp.
Beskrivning	OBJ är ett öppet format som lagrar 3D-objekt och accepteras av nästan alla CAD/fotogrammetri/3D-modelleringsprogram. Formatet kan användas för många olika typer av 3D-objekt och kan lagra filer med höga polygon-tal och komplex polygonstruktur. Formatet lagrar både geometri och textur och består av en obj-fil (ASCII eller i ett binärt format) tillsammans med en mtl-fil (material och textur) och en bild (den faktiska texturen hämtas från ett fotografi). För mycket komplexa 3D-dataset och visualiseringar är COLLADA- och X3D-formaten att föredra, men i de flesta fall är OBJ ett tillräckligt gott format.
Rekommendationer	Lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande av punktmoln och meshmodeller. ASCII-formatet föredras för bevarande.

XYZ Point cloud

Filformat/-ändelse	XYZ/.xyz
Format	XYZ är ett generiskt filformat för lagring av tredimensionella punktmoln.
Beskrivning	Det saknas en officiell specifikation för XYZ Point cloud. Formatet finns både som ett ASCII-baserat format och som ett binärt format. I ASCII-formatet presenteras placeringen för varje punkt/hörn (i meshmodeller motsvarar punkterna hörnen på polygonerna) av tre kolumner där

	<p>varje kolumn innehåller antingen x, y eller z-värden. Därefter kan det också finnas ytterligare kolumner med till exempel RGB-information. .xyz-formatet kan betraktas som en del av en mer generell typ av filformat och det finns stora variationer mellan hur olika XYZ-filer lagrar data. Därför konverteras XYZ-filer vanligen till andra filformat, exempelvis CSV. Idag är det få fotogrammetriprogram som klarar av att importera XYZ-filer.</p>
Rekommendationer	Ej lämpligt för tillgängliggörande och långtidsbevarande.

5. Bibliografi

Bennett, M (2015). *Evaluating the Creation and Preservation Challenges of Photogrammetry-based 3D Models*. Published Works. 52. http://digitalcommons.uconn.edu/libr_pubs/52

Bryan, P., Blake, B. & Bedford, J. (2009) *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*. English Heritage.

D'Ayala, D., & Smars, P. (2003) *Minimum requirements for metric use of non-metric photographic documentation*. University of Bath.

Waldhäusl, P. & Ogleby, C. (1994) *3x3-Rules for Simple Photogrammetric Documentation of Architecture*, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXX, Part 5*. Melbourne, pp. 426-429.

Wenhao, F (2001) *Control work in close range photogrammetry*, *Geo-spatial Information Science*, 4:4, 66-72, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02826581>