

Inspektion av broar med optiska hjälpmedel

– En utvärdering av tre olika metoder



Historiskt och traditionellt har inspektioner av infrastrukturanläggningar som broar och tunnlar primärt genomförts via okulära inspektioner. Dessa inspektioner är generellt sett tidsödande och subjektiva då de baseras på inspektörers erfarenhet och kunskap samt de aktuella förhållanden som råder vid tidpunkten för inspektion [1]. Dessa observationer och mätningar är ofta dokumenterade i fältanteckningar, skisser, fotografier etc. som sedan införs i Trafikverkets broförvaltningssystem. Okulära besiktningar är även begränsade till enbart relativt lättillgängliga byggnadsdelar, särskilt hos broar där omgivande terräng kan vara besvärlig och ofta kräver speciella lyftanordningar för tillfredsställande inspektioner. Graybeal et al. [2] noterade att den här typen av rutininspektioner har väldigt dålig noggrannhet, där följande faktorer påverkar tillförlitligheten hos resultaten: fysisk fara från omgivande trafik, handnära okulär uppfattningsförmåga, färgseende samt tillgänglighet och komplexitet hos anläggningen. Det finns således ett behov av nya teknologier för inspektion och tillståndsbedömning av infrastrukturanläggningar. Dessa teknologier bör vara utformade på sådant sätt att trafikstörningar minskas samt innehar hög tillförlitlighet hos insamlad data.

Studien som beskrivs i den här artikeln jämför funktionen hos tre olika optiska teknologier för 3D geometrisk model-

lering av befintliga konstruktioner. De teknologier som beskrivs här är marklaser (terrestrial laser scanning, TLS), fotogrammetri (close-range photogrammetry, CRP) och infraröd skanning (infrared scanning, IS). Teknikerna har utvärderats på sex järnvägsbroar av armerad betong.



Cosmin Popescu
tekn. Dr. Luleå tekniska universitet



Thomas Blanksvärd
Bitr.Prof. Skanska Sverige AB/Teknik



Björn Täljsten
Prof. Luleå tekniska universitet

De sex utvärderade broarna

De broar som valdes ut för demonstration befinner sig samtliga på Malmbanan i Norrbotten och är i bruk. Pågående trafik stördes inte i samband med studien. Broarnas tillgänglighet varierade, där vissa var lättillgängliga (vägöverfart i stadsmiljö) medan andra var svårare att komma åt (avlägsna och med svår terräng). Fältstudien genomfördes under en relativt kort tidsperiod, 5 dagar, vilket då även infattade tid för resa. *Figur 1* visar fotografier tagna av de sex olika broarna samt deras läge på Malmbanan, broarna är numrerade i den ordningen de blev skannade.

Geometrisk rekonstruktion – teknologier och utrustning

Terrestrial laser scanning – TLS

I TLS fås anläggningens 3D geometri från tillämpning av LiDAR teknologi (Light Detection And Ranging). Systemet fungerar genom att avge ljus och sedan detektera dess reflektion för att bestämma avståndet till objektet. 3D modellerna skapas genom att väva samman multipla skanningar i ett känt koordinatsystem. Teknologin använder antingen så kallad time-of-flight eller phase-based technology för att bestämma x, y, z-koordinater och intensitetsdata för skannade objekt. Utrustningen som tillämpades i denna studie var långdistanslaserskanter, RIEGL VZ-400, se *figur 2a*. Denna 3D-skanner tillämpar time-of-flight och kan mäta på ett avstånd om 1.5–600 m med en noggrannhet på 5 mm vid 100 m avstånd. Rådata från TLS, till exempel punktmoln från multipla skanningar, postprocessades med Leicas Cyclone mjukvara som automatiskt ställer samman skanningarna och exporterar punktmolnet i olika former för vidare utvärdering.

Close-range photogrammetry – CRP

I CRP tas olika serier foton med en digitalkamera, vanligtvis tillämpas olika måltavlor eller mönster. Dessa foton identifieras sedan baserad på dess



Figur 1: Broarnas geografiska läge samt foton på samtliga undersökta broar. Karta från "Maphill".



Figur 2: Utrustning: (a) TLS – RIEGL VZ-400; (b) CRP – Canon EOS 5D; (c) UAV – 3DR Site scan; och (d) IS – Matterport Pro2 3D.

unika egenskaper (mönster, måltavlor, referenspunkter etc.) och en 3D modell kan skapas. För att göra denna process enklare bör ytorna hos det fotograferade objektet ha unika egenskaper, till exempel naturliga (skarpa kanter, färgkonstraster, bultar, räl) eller artificiella mönster eller måltavlor. För att få en bra modell måste det förekomma minst 60 procent överlapp mellan foton i både longitudinellt och transversellt led. Mjukvaran som användes för att skapa 3D-modellerna var Agisoft PhotoScan Pro. Utrustningen bestod av en digitalkamera, Canon EOS 5D, med en upplösning om 12.8 megapixels (4368×2912) och fast vidvinkelobjektiv, Canon EF 35 mm, se figur 2b. Vid en av de skannade broarna användes även en annan något bättre digitalkamera, Canon EOS 5D Mark II, med en upplösning om 21.1 megapixel och Canon EF 24 mm objektiv. Foton tagna med den sistnämnda kameran

kompletterades även med drönarfoton (unmanned aerial vehicle, UAV) tagna med en 3DR Site Scan drönare utrustad med en Sony R10C digitalkamera med 16–50 mm zoomobjektiv, se figur 2c. Denna kamera har en upplösning på 20.1 megapixel och en APS-C sensortyp. 3D-modellerna skapades med mjukvaran Bentley ContextCapture för foton tagna med kameran Canon EOS 5D Mark II och UAV.

Infrared scanning – IS

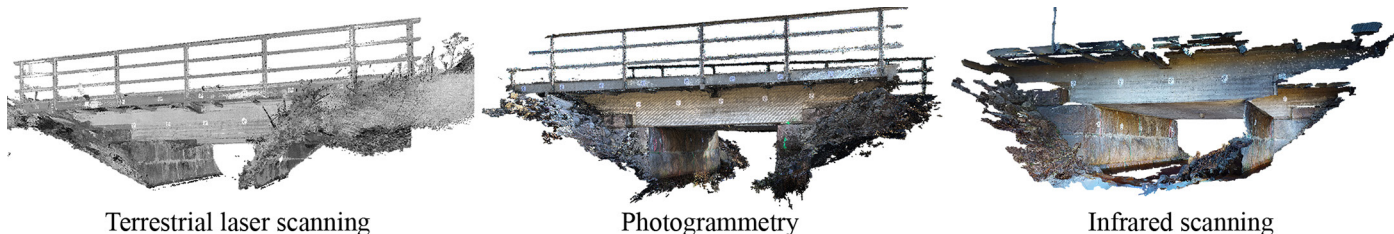
Skanningen med infraröd kamera utfördes med RGB-D kameror i kombination med en infraröd kamera och en infraröd projektor för att få stillbilder med djupinformation. Sensorerna projicerar ett infrarött ljusmönster på objektet, ljuset reflekteras och fångas upp av infrarödkameran som sedan används för att beräkna djup. Utrustningen som användes i denna studie var en

Matterport Pro2 3D kamera, figur 2d, med tre infrarödsensorer som mäter djup tillsammans med visuell data (RGB) med 360° i horisontalplanet och 300° i vertikalplanet. Foton tas med en upplösning om 8092×4552 pixel. Utrustningen är trådlöst ansluten till en surfplatta som samlar upp data från skanningen. Utrustningens skanningsavstånd är 4.5 m för inomhusmiljöer och för utomhusmiljöer krävs fler positioner för skanning. För att undvika mätfel bör skanningen genomföras i skymning eller i samband med molnighet, det vill säga 30 min före soluppgång eller 30 min efter solnedgång, för att undvika infraröd strålning från solen. När skanningen är genomförd laddas data upp till en molntjänst, Matterport cloud service, som sedan registrerar data och skapar ett punktmoln baserat på denna.

Dokumentation och visualisering

Det första steget för utvärdering omfattades av visualisering av de digitala modellerna inklusive detaljnivån från respektive optisk metod. 3D-modellerna för varje inspekterad bro, baserad på TLS-, CRP- och IS-teknologi, är redovisad i figur 3-7. Eftersom att överlappningen mellan foton (CRP) på bron över Edbäcken (den första bron som skannades) inte var tillräckliga kunde inte en 3D-modell skapas. Sedermera förekom även problem orienteringen av data från Matterportutrustningen (IS) på grund av för mycket bakgrundsljus.

Punktmolnen från TLS var i gråskala vilket innebär att ingen RGB-information fanns tillgänglig. De modeller som baserades på fotogrammetri (CRP) inhämtade tillräckligt med data för att modellera broarnas byggnadsdelar (landfasten, pelare och brodäck). Områden runt broarna modellerades å andra sidan sämre, endast räcken kunde modelleras. Det var alltså inte möjligt att modellera vegetationen runt bron på ett bra sätt eftersom att fotogrammetrin utfördes från marknivå vilket begränsade den undersökta volymen. Fotogrammetrimodellerna inkluderade RGB-data, till skillnad från TLS-teknologin i den här studien, vilket innebär att visualiseringen blev mer naturtrogen gällande färgsättning. 3D-modellerna från IS-teknologin inkluderade mindre mängd information än teknologierna baserade på TLS och CPR. För IS-teknologin inhämtades tillräckligt med data för att få ut allmänna dimensioner



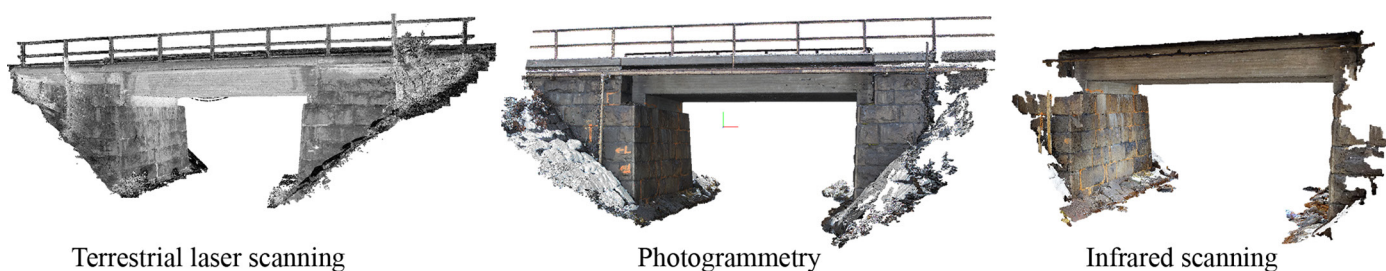
Figur 3: 3D modeller av bron över Påunabäcken – skillnader i detaljnivå mellan de olika utvärderade teknologierna.



Figur 4: 3D modeller för bron över Kedkejokk – Påunabäcken – skillnader i detaljnivå mellan de olika utvärderade teknologierna.



Figur 5: 3D modeller för bron över Juovajokk – Påunabäcken – skillnader i detaljnivå mellan de olika utvärderade teknologierna.



Figur 6: 3D modeller för bron över Pahtajokk – skillnader i detaljnivå mellan de olika utvärderade teknologierna.



Figur 7: 3D modeller för bron över Kallkällevägen – skillnader i detaljnivå mellan de olika utvärderade teknologierna.



Figur 8: CRP modeller för bron över Pahtajokk: (a) Modell 1; (b) Modell 2 och (c) Modell 3.

för landfästen och brodäck, samt även RGB-data. Information för anslutande delar till broarna, till exempel vegetation och räcken, kunde inte inhämtas eftersom att dessa var utanför IS-utrustningens räckvidd. Tre olika modeller sammanställdes för att undersöka hur olika faktorer påverkar kvaliteten av resultaten från CPR-teknologin (fotogrammetri). Dessa modeller jämfördes för bron över Pahtajokk och baserades på samtliga foton som togs med de olika utrustningarna. Faktorer som påverkade resultaten inkluderade; erfarenheten hos operatörerna (två olika lag tog foton, lag 1 med endast erfarenhet i kontrollerad laboriemiljö och lag 2 med stor erfarenhet), kvaliteten på anskaffningen av foton, utvärderarens färdigheter för efterbehandling och analys samt förtroendet med utvalda mjukvaror för analys. De tre modellerna för fotometriskanalys, för bron över Pahtajokk, omfattade:

- Modell 1 – Utvärdering av lag 1 med foton som lag 1 tagit (Agisoft PhotoScan Pro + Canon 5D)
- Modell 2 – Utvärdering av lag 2 med foton som lag 1 tagit (Bentley ContextCapture + Canon 5D)
- Modell 3 – Utvärdering av lag 2 med foton som lag 2 (Bentley ContextCapture + Canon 5D Mark II + 3DR Site Scan drone)

Baserat på resultaten från dessa tre olika modeller kunde ingen signifikant skillnad noteras, se figur 8. Detta indikerar på att kvaliteten och mängden foton (för att få överlapp) var tillräcklig för att skapa 3D-modeller, oberoende av de olika lagens tidigare erfarenheter. Detta är en viktig observation eftersom att

denna indikerar på att teknologin har en låg inlärningskurva och med lätthet kan införlivas även för användare med låg erfarenhet. Modell 3 omfattade även foton tagen med UAV vilket införlivade information om omgivning runt bron.

Geometrisk avvikelse

Punktmolnen som genererades importerades till mjukvaran Autodesk ReCap för att få ut mätbara geometrier. Befintliga ritningar användes för att etablera en jämförbar basnivå. De geometriska avvikelserna analyserades baserat på stegvis mätning, vidare studier skulle dock vara av intresse för att jämföra 3D-modellerna som skapats med 3D-modeller tagna i ett senare skede. En sådan analys kommer att genomföras

under senhösten 2018 och förväntas ge information om de eventuella globala rörelser, till exempel sättningar, som kan ha uppkommit mellan tidpunkten för mätning. Med ett fåtal undantag, gav samtliga metoder god noggrannhet vilket redovisas i tabell 1. I samband med undersökningen noterades det även att bron över Kedkejokk hade reparerats och befintliga ritningar hade inte uppdaterats gällande denna reparation. Detta innebär att inte geometriska avvikelser kunde beräknas för denna bro jämfört med aktuella ritningar. Dock kunde mätningar genomföras för att jämföra de olika skanningsteknologierna. Under antagandet att TLS-teknologin har bäst noggrannhet och därmed ligger närmast verkligheten, blir slutsatsen att IS-data avviker något medan CRP har problem att skala krökta ytor.

Slutsats och framtida utveckling

Denna undersökning har analyserat tre olika teknologier för optisk mätning i syfte att skapa digitala modeller för broar. Undersökningen visar att dessa 3D-modeller kan fungera som ett verktyg i samband med inspektion av broar där bland annat geometrier kan analyseras. En komplett inspektion och analys av broarna är i dagsläget försvårat beroende på restriktioner i tillgänglighet (utan att störa pågående trafik) samt att vissa områden kan vara svåråtkomliga för detaljerad optisk mätning.

De huvudsakliga slutsatserna från denna studie är:

- Samtliga metoder skapar digitala modeller med olika nivåer på detalj-

Tabell 1: Noggrannhet hos modellerna baserade på TLS-, CRP- och IS-teknologi*. Ursprungliga värden innan reparation.

Bro	Dimension enligt ritning	Terrestrial laser scanning		Close-range Photogrammetry		Infrared scanning	
	(mm)	(mm)	%□L	(mm)	%□L	(mm)	%□L
Påunakbäcken							
Spann	2950	2930	-0.68%	2947	-0.10%	2985	1.19%
Bredd (brodäck)	4500	4517	0.38%	4525	0.56%	4546	1.02%
Kedkejokk							
Spann	4000*	2750	-	3080	-	2727	-
Höjd	2000*	1353	-	1540	-	1286	-
Juovajokk							
Spann	5500	5434	-1.20%	5412	-1.60%	5458	-0.76%
Bredd (brodäck)	3800	3780	-0.53%	3735	-1.71%	3780	-0.53%
Pahtajokk							
Spann	6900	6928	0.41%	7735	12.10%	6958	0.84%
Bredd (brodäck)	3900	3904	0.10%	4376	12.21%	3926	0.67%
Kallkällevägen							
Spann	14500	14592	0.63%	14468	-0.22%	14828	2.26%
Bredd (brodäck)	4540	4526	-0.31%	4510	-0.66%	4628	1.94%
Diameter (pelare)	1000	1000	0.00%	977	-2.30%	1009	0.90%

rikedom. De allmänna geometrierna kunde mätas med god noggrannhet, till exempel spann, bredd på brodäck, avstånd till överbyggnad, pelare etc.

- Punktmolnen framställda med TLS- och CRP-teknologier var avsevärt mer informationsrika än modellerna från IS-teknologin. Tätare punktmoln innebär bättre visualisering men på bekostnad av tid för efterbehandling samt ökade datamängder.
- CRP och IS metoderna ger RGB-data medan TLS metoden (i denna studie) endast ger intensitetsdata. RGB-data ger mer realistiska visualisering vilket kan hjälpa inspektörer att upptäcka områden med misstänkta skador.
- Det behövs ingen speciell träning för att kunna skapa 3D-modeller med god kvalitet gällande CRP- och IS-teknologierna. Dock behövs en någorlunda hög kunskapsnivå och erfarenhet för att efterbehandla och analysera inhämtad data i mjukvara för att säkerställa högkvalitativa modeller baserat på CRP-teknologi.

Förutom några små nackdelar, har optiska metoder för 3D-modeller många

fördelar som gör dessa teknologier attraktiva för inspektion och tillståndsbedömning av befintlig infrastruktur-anläggningar. Tillämpningen av icke-berörande teknologier kan förbättra metoderna för inspektion och tillståndsbedömning som inte påverkar pågående trafik. De här typerna av teknologi borde även öka noggrannheten och tillförlitligheten vid broinspektioner genom att de inte är lika operatörsberoende som traditionella inspektioner. Ytterligare fördelar är även att äldre konstruktioner kan digitaliseras i form av 3D-modeller på ett effektivt sätt och förändringen över tid kan enklare övervakas och lagras.

Författarna vill tacka följande

Resultaten från denna studie baseras på ett examensarbete som utförts vid Luleå Tekniska Universitet av David C. Gärden och Alexander Jimenez, med titeln: "Optical methods for 3D-reconstruction of railway bridges: Infrared scanning, close range photogrammetry and terrestrial laser scanning" [3]. Författarna vill även tacka Trafikverket som finansierat under-

sökningen inom projektet "In2Track: Research into enhanced tracks, switches and structures". Författarna vill även tacka Marek Bascik och Bartosz Ajszpur (båda från 3Deling, Polen) för deras tekniska support och hjälp med TLS och UAV mätningarna. ■

Referenser

- [1] Phares BM, Washer GA, Rolander DD, Graybeal BA, Moore M. *Routine Highway Bridge Inspection Condition Documentation Accuracy and Reliability*. J Bridge Eng. 2004;9:403-13.
- [2] Graybeal BA, Phares BM, Rolander DD, Moore M, Washer G. *Visual Inspection of Highway Bridges*. Journal of Nondestructive Evaluation. 2002;21:67-83.
- [3] Jiménez A, Gärden DC. *Optical methods for 3D-reconstruction of railway bridges: Infrared scanning, Close range photogrammetry and Terrestrial laser scanning* [MSc Thesis]. Luleå: Luleå University of Technology; 2018.

Endast 425 kronor plus moms kostar en helårsprenumeration på Bygg & teknik 2019!