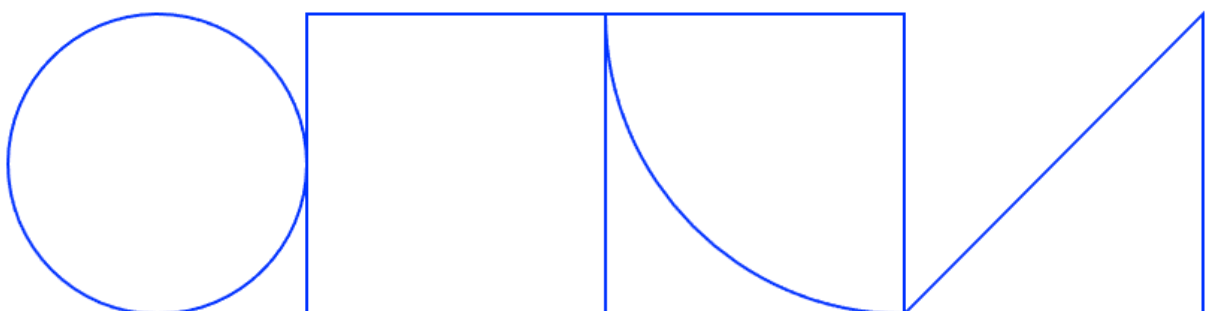


PROJEKTNR. **14364**

Autonom återkoppling och bevakning på byggarbetsplatsen

Helena Eriksson & Mathias Haage
PEAB & LTH

2025-09-30



Förord

Arbetet som sammanfattas i den här rapporten har utförts under 2024-2025 i samarbete med Peab, ProdTex, LTU samt Center för byggrobotik vid LTH.

Medverkande i arbetsgruppen:

- PEAB – Helena Eriksson, Max Bergström, Kristoffer Sundvall samt Fredrik Johansson
- Center för byggrobotik vid LTH - Mathias Haage, Institutionen för Datavetenskap LTH
- ProdTex – Albin Jonsson
- LTU – Jarkko Erikshammar

Medverkande i referensgrupp:

- PEAB – Rasmus Öhman
- Byggföretagen – Christine Olofsson
- LTU – Lars Stehn
- Cognibotics – Klas Nilsson
- LTH - Miklos Molnar
- FoU-väst

Detta SBUF-projekt har samarbetat med Smart Built Environment-projektet 2022-00098

("Automatiserade produktivitetmätningar för byggprojekt") som har mätt effekterna av ökad tillgänglighet till insamlad data.

Vid pennan,

Helena Eriksson & Mathias Haage

September 2025

Sammanfattning

Digitaliseringen av byggbranschen skapar nya möjligheter att förbättra planering, uppföljning och säkerhet på byggarbetsplatser. I detta projekt har vi undersökt hur autonom robotteknik kan användas för att samla in, analysera och återkoppla information från en byggarbetsplats, med målet att minska manuellt arbete och förbättra informationsflödet till produktionspersonalen.

Arbetet har genomförts inom tre olika fokusområden;

1. **Dataanalys och informationsåterkoppling till produktionspersonal** – Vi utvecklade en metod för att automatiskt identifiera förändringar mellan två insamlingstillfällen och generera en rapport med före-/efter-bilder. Detta gör det möjligt att följa upp produktionstakt och förändringar på arbetsplatsen utan manuell platsgenomgång. Vi har undersökt potentialen att mäta byggprogression kvantitativt genom att jämföra punktmoln och videodata över tid. Arbetet visar att det finns en möjlig väg framåt för att uppskatta produktionsgrad automatiskt, även utan fullständig objektklassificering.
2. **Autonom bevakning** – Vi testade roboten Spot från Boston Dynamics utrustad med termisk kamera och bildanalys för att identifiera avvikelser och justera sin bevakningsrutt i realtid. Resultaten visar att roboten kan användas för att övervaka arbetsplatsen under obemannade tider och indikera potentiella säkerhetsrisker.
3. **BIM till rutt för robot** – Med hjälp av 3DExperience utvecklades ett arbetsflöde för att definiera och exportera inspektionsrutter från BIM-modellen till roboten. Detta minskar behovet av manuell programmering och möjliggör snabb uppdatering av rutter i takt med att byggplatsen förändras.

Material från denna studie kommer att skickas in för publikation i Construction Robotics¹.

¹ <https://link.springer.com/journal/41693>

Innehåll

Förord	1
Sammanfattning	2
BAKGRUND	4
SYFTE	4
METODIK	5
DATAANALYS OCH INFORMATIONSAÅTERKOPPLING TILL PRODUKTIONSPERSONAL	5
Erfarenheter från insamling av data	9
Egen beräkningspipeline för inspektionsdata	10
Databehandling i pipelinen	11
Test av annan mjukvara	12
Diskussion	14
Slutsatser	15
BEVAKNING	15
Förändring av rutt vid larm	16
Larm	18
Slutsatser	19
INSPEKTIONSRUTTER TILL AUTONOM UTRUSTNING	20
Slutsatser:	22
Det vi kan göra	22
Det vi ännu inte vet om vi kan göra	22
Övergripande slutsats	22
Tillgodogörande av data mot digitala system och arbetsplatspersonal	23
Alternativa uppdrag	23
Inspektionsrutter från BIM/CAD-modell	23

BAKGRUND

Under de senaste åren har tre SBUF-projekt genomförts med fokus på att utvärdera mobil robotteknik för datainsamling i byggmiljö, där robothunden Buster (Spot från Boston Dynamics) testats på Peabs byggarbetsplats Vipan i Lund.

Det första projektet (SBUF 13967) hade som mål att kartlägga nuläget för autonoma inspektionsrobotar och undersöka deras möjligheter och begränsningar i svensk byggarbetsmiljö. Det andra projektet (SBUF 14115) byggde vidare med praktiska tester av datainsamling i flera byggfaser. Här samlades bild- och videomaterial samt lidar-data in, vilket lade grunden till en digital tvilling med tidslinje. Projektet omfattade även tester av integration mot byggverktyget Dalux samt precisionsutsättning med hjälp av externt koordinatsystem. Ett särskilt fokus låg på att identifiera användningsfall där roboten kan ge direkt mervärde, exempelvis progressionsmätning och enklare utsättningsuppgifter med robotarm.

Denna rapport redovisar det tredje projektet (SBUF 14364) som har byggt vidare på dessa erfarenheter. Här har arbetet inriktats på att utveckla metodik för hur insamlad information på ett effektivt sätt kan delges arbetsplatspersonal. Genom automatiserad analys av rundvandringar kan skillnader mellan två mättillfällen detekteras och redovisas både i punktmolnsform och som före- och efterbilder. På så sätt kan datainsamlingen omsättas i användbar information för produktionen.

Projektet har även utvärderat möjligheten att använda roboten för autonom bevakning. I arbetet utrustades Spot med en extra sensor, en värmekamera. Avsikten var att nyttja denna för att identifiera öppna dörrar och fönster genom att detektera kalla områden under vintertid när värmeförhållanden skiljer sig tydligt mellan inomhus- och utomhusmiljöer. Nu kom testerna i examensarbetet att ske under vår/sommar. Av detta skäl genomfördes detektion på kroppar istället för dörrar.

För att hantera inspektionsruttor och koppla arbetet till BIM har Dassaults 3D Experience testats, i nära samarbete med projektpartnern ProdTex. Detta verktyg har möjliggjort definiering och export av ruttor på ett sätt som stödjer fortsatt utveckling mot mer automatiserade arbetsflöden.

Tillsammans utgör dessa tre projekt en stegvis utveckling där fokus har gått från att testa robotens närvaro på byggarbetsplatsen, till datainsamling i produktionen, och slutligen till metodik för att skapa direkt användbar information och utvärdera nya tillämpningsområden som bevakning.

SYFTE

Huvudsyftet har varit att undersöka möjligheter och begränsningar med dataanalys på insamlat material i syfte att filtrera insamlad data så att enbart information som är av värde för produktionspersonal i givet tidsögonblick presenteras.

Ett mindre delsyfte var att utvärdera robothunden ur ett bevakningsperspektiv för att se om det går att med en värmekamera upptäcka öppna dörrar och fönster vintertid, samt med "vanlig" kamera upptäcka saknade föremål.

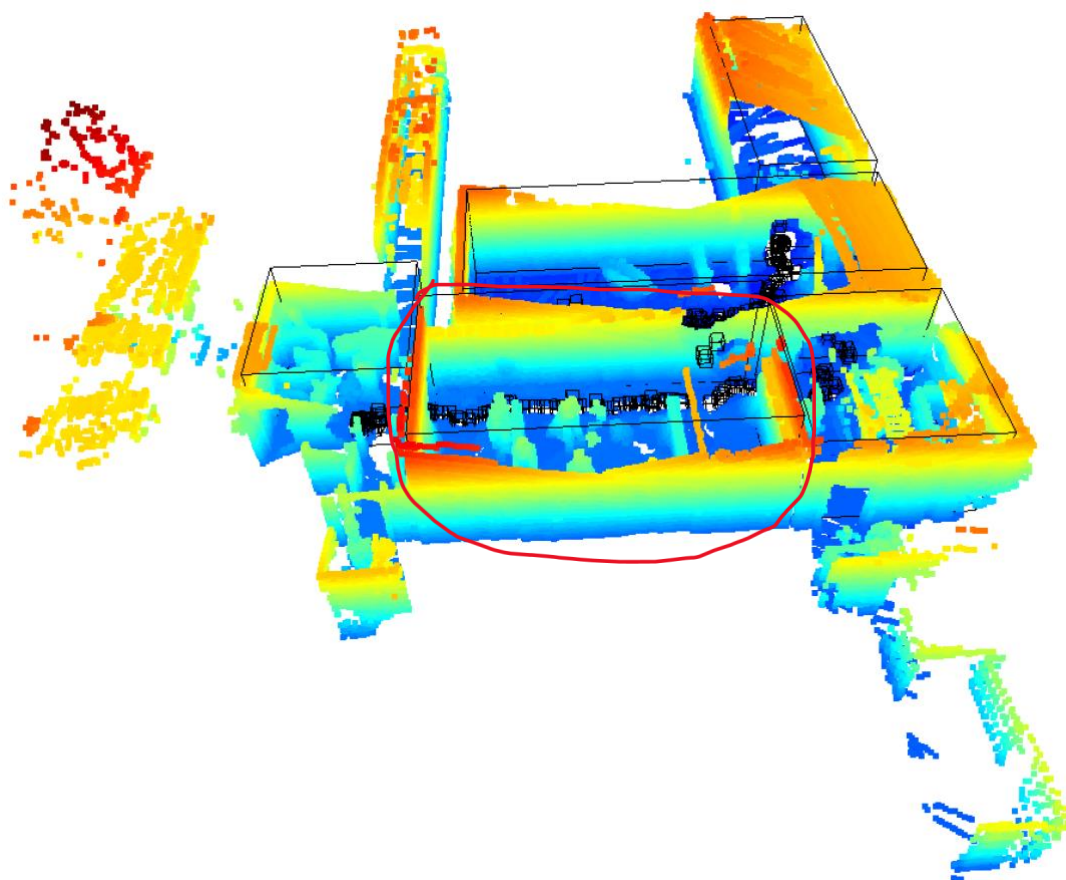
METODIK

Projektet har genomförts i nära samarbete med Peab projektet Vipan i Lund, Center för Byggrobotik, Prodtex samt Smartbuilt-projektet 2022-00098 för nyttjande av insamlad information för processuppföljning tillsammans med Luleå Tekniska Högskola.

Genomförandet har skett i fem olika arbetspaket där AP1 var projektledning och administration. AP2 handlade om att utveckla en beräkningspipeline för filtrering och visualisering av ett valt urval av information som är av värde för produktionspersonal. AP3 var utvärdering av en bevakningsfunktion, AP 4 var lagring och export av inspektionsrutter till operatör och autonom utrustning och AP5 var den öppna redovisningen och kommunikation.

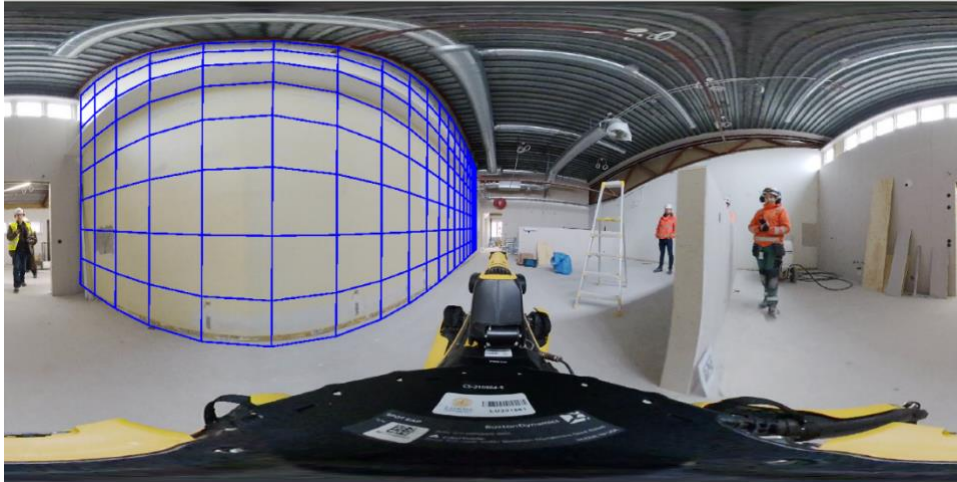
DATAANALYS OCH INFORMATIONSÅTERKOPPLING TILL PRODUKTIONSPERSONAL

Här undersökte vi möjligheter, begränsningar och utmaningar i att jämföra och omvandla data som samlats in av autonomt rundvandrande Spot till information och visualiseringar som kan förmedlas till byggarbetare och digitala system. Figur 1-7 med figurtexter ger en snabb överblick över arbetspaketet.



Figur 1. Insamlad data från rundvandring med Spot består av två datakällor. Här syns data från den ena källan som består av punktmoln från Spots navigeringslidar, färgkodade efter höjd. Det

inringade rummet är vad som syns i andra figurer nedan. En utmaning (och lärdom) är att detta dataset täcker inte alla ytor. I bild täcks fasta strukturer som golv, tak och väggar delvis.

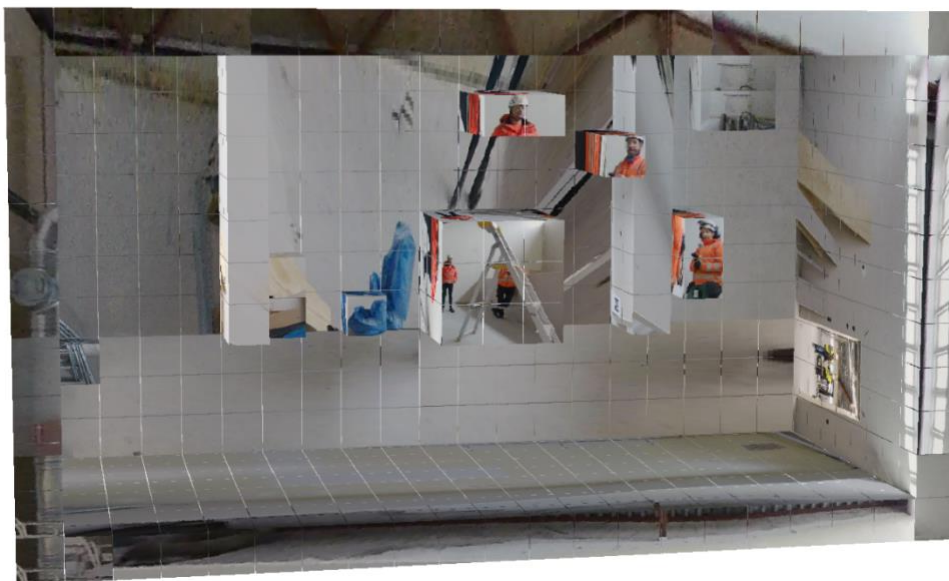


Figur 2. Här syns data från den andra datakällan, 360-kamera, som nyttjats vid rundvandring med Spot. Det som visas är en bild ur insamlad video. Kanske går det att komplettera punktmoln från figur 1 genom att återskapa denna information från video, men att många ytor har uniform textur gör detta utmanande. Nu utnyttjas video enbart för färgläggning. Det blå rutnätet visar pålagt blockmönster som nyttjats för manuell justering inför färgsättning för att kompensera för bugg. För virtuell inspektion nyttjas data som i bild. Applikationer som Dalux kan lokalisera och visa sådana bilder utspritt på en BIM-modell.

Frågorna som arbetspaketet utgått ifrån är:

- Kan jämförelser göras mellan insamlad data från olika rundvandringar göras automatiskt och kommuniceras till människa och digitalt system?
- Kan mätetal för progression produceras automatiskt?

För att illustrera frågorna har ett rum valts ut som besökts flitigt under autonom rundvandring med Spot. Rummet figurerar i figur 1-7. Rummet ska bli ett kök, men köket är inte färdigbyggt så det finns än så länge inga köksdetaljer, bara två halvhöga väggar. Under den inspektionstur som visas i figur 3-5 så står det en stege mellan de två halvhöga väggarna. Där finns också en blå platsäck med skräp och lite material vid den vänstra halvhöga väggen i mittdelen av rummet. Längst till höger finns en utrustning på hjul. Det står även lite material lutat mot väggen. Längst till vänster finns lite material vid väggen precis bredvid dörren. Dessutom befinner sig tre personer i rummet.



Figur 3. För att möjliggöra automatisk inspektion och progressionsmätning behöver data delas upp i enheter som kan jämföras. Enheten behöver vara mindre än byggelementen för att kunna kvantifiera progression på dessa. Bilden visar en visualisering där data från de två datakällorna delas in i block med 0.5 m sida. Blocken innehåller urval av punktmoln från lidar och utskurna bilder från 360-kamera. Finns BIM tillgängligt kan blocken även innehålla referenser till BIM byggdetaljer.

Roboten har gått rakt från dörr till dörr, höger till vänster längst ner i bild, samtidigt som den filmat video och samlat in punktmoln.

När rundvandringen är över har data lästs ut från robot och 360-kamera. Data har därefter getts en efterbehandling som tagits fram i detta arbetspaket. Efterbehandlingen består i att linjera upp data så att den blir jämförbar mellan olika datum och tidpunkter och att grovindela data geometriskt till block som kan jämföras på individnivå och även relateras till BIM om sådan modell finns tillgänglig. Block innehåller därmed både utskurna punktmoln och bilder och eventuellt referenser till BIM.



Figur 4. En möjlighet för att skapa snabb överblick är att skapa en 3D miniatyrmodell av arbetsplatsen för direkt visning i dator i t ex en spelmotor. Men det finns utmaningar med att

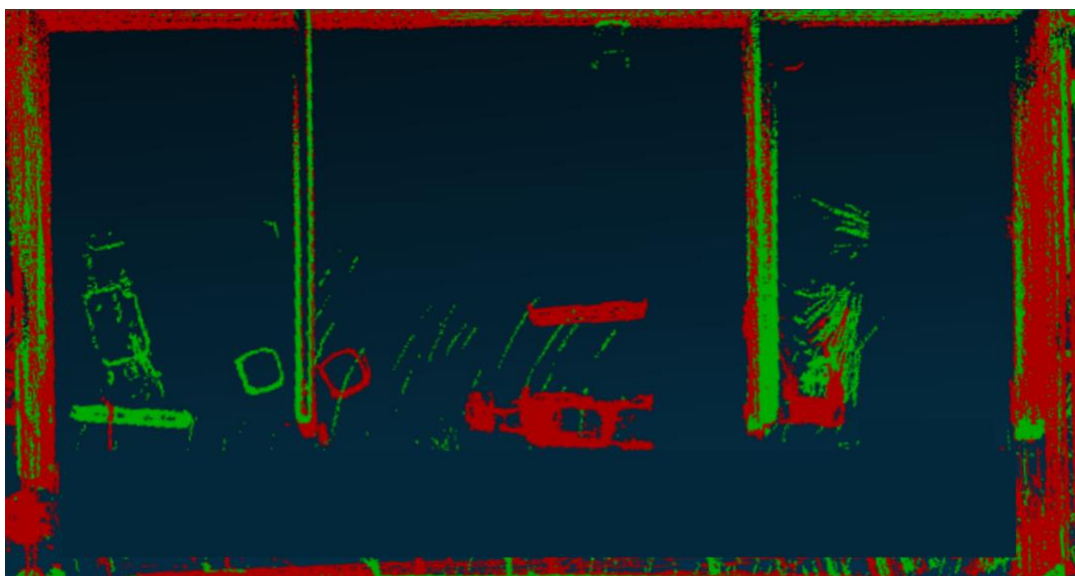
bygga en sådan modell utifrån insamlad data. Golvet i bilden ser segmenterat ut. Detta beror på att färgsättning av valts från olika tidpunkter i inspelad video och då fått olika ljussättning och skuggbeläggning. Golvet har även "objektskuggor" som beror på att denna del av golvet inte varit synlig från roboten. Lösa föremål representeras av boxar. Detta beror på att det ibland inte finns tillräckligt med punkter i insamlad punktmoln för att skapa en bra geometrimodell av föremålet eller direkt visa punktmolnet. Till viss del hade det kunnat avhjälpas genom att nyttja 360-video för att återskapa föremålets geometri.

Tillgång till grovindelad data gör automatiska granskningsförfaranden som beror på grov geometri tillgängliga.

- Block som innehåller punktmoln kan jämföras med motsvarande block som refererar till ett urval av BIM byggelement. Ett måttetal som grovt indikerar hur stor andel av byggelementen som har en motsvarighet i punktmoln går att ta fram.
- Utskurna bilder i block motsvarande byggelement kan, om granskningsmetod finns tillgänglig, granskas före och efter planerat utfört arbete på yta för att validera att arbete blivit utfört. Möjligheter och begränsningar med automatisk validering av utvalda bilder är dock inte utrett i projektet.
- Ytor med speciell innebörd i BIM (se digital APD-plan i BIM, projekt SmartBuilt 2022-00098), som utrymningsväg eller avställningsyta, kan selektera ett urval av block på dessa ytor. Ett sådant urval kan markeras i rapportering eller förmedlas till ett digitalt system som revision.



Figur 5. En annat sätt att visualisera är att nyttja utskurna bilder och positionera dessa ovanpå en karta, kanske en blåritning eller som här en projektion av punktmoln ner på ett plan. Utskurna bilder skulle också kunna nyttjas för att automatiskt bilägga bildmaterial i rapportering.



Figur 6. Alla modeller kan överlagras på varandra. Det är möjligt att jämföra data mellan olika tidpunkter. Här har punktmoln mellan två tidpunkter jämförts som visar hur utrustning tillkommit eller försvunnit enligt samma princip som visats i tidigare projekt, då i jämförelse med BIM.



Figur 7. Det är möjligt att extrahera färgsättning relaterat till BIM-element och visualisera längs en tidsaxel. Här har den blåmarkerade väggen från figur 2 lagts upp längs en tidsaxel. Det går att se att ett värmeelement monterades någon gång mitten av mars till mitten av april. Väggen har även blivit målad, men detta är svårare att se från bilderna. Block gör det möjligt att katalogisera data med referens till BIM-element. Just detta exempel är en mockup på grund av bugg för färgsättning.

Figur 5-7 visar hur visualiseringar skulle kunna se ut.

Erfarenheter från insamling av data

Datainsamling sker med roboten Spot som rör sig runt på byggarbetsplatsen. I tidigare projekt (SBUF 13967 och 14115) har två arbetsmetoder använts:

1. Autonom inspektionsrundvandring – en förprogrammerad rutt startas och genomförs automatiskt.
2. Operatörsguidad inspektion – en operatör styr roboten manuellt och följer med under inspektionen.

Erfarenheterna visar att den autonoma metoden fungerar väl i vissa byggfaser, medan operatörsguidning är mer lämplig i andra.

Spot är en industrirobot och måste omges av en skyddszon när den används nära människor. Vid operatörsguidning ansvarar operatören för säkerheten, vilket möjliggör användning under arbetstid. För autonoma rundvandringar krävs särskilda säkerhetsåtgärder, och rekommendationen är därför att utföra dessa efter arbetstid.

Autonom inspektion är beroende av navigeringsmarkörer, i praktiken QR-koder, som placeras på byggarbetsplatsens ytskikt. Metoden fungerar bra i byggfaser där ytskikten är stabila. I faser där innerväggar byggs eller ytskikt ofta förändras är operatörsguidning mer tillförlitlig.

En central skillnad mellan bärbar inspektionsutrustning, exempelvis i form av smarta hjälmar, och utrustning som placeras på Spot, är robotens kapacitet. Spot kan bära upp till 14 kg utrustning och har ett batteri som möjliggör kontinuerlig drift under inspektionen. Detta gör roboten till ett ergonomiskt verktyg, som kan användas både manuellt och autonomt. Resultatet har även belysts i projektet SmartBuild 2022-00098 och redovisas här för att ge en samlad bild av robotens potential på byggarbetsplatsen.

Det är dock inte nödvändigt att använda just Spot för inspektion. Nya robotlösningar för inspektionsändamål introduceras nu på marknaden. En artikel av Lee m.fl. (2023)² ger en översikt av aktuell robothårdvara för inspektion, främst inom civil infrastruktur, men slutsatserna är relevanta även för byggarbetsplatser. Spot kan därför ses som en representant för en bredare kategori av inspektionsrobotar.

Egen beräkningspipeline för inspektionsdata

Arbetspaket 2 har valt att utveckla en egen beräkningspipeline för att hantera data från inspektionsrundor. Skälen är flera:

1. Begränsningar i befintlig mjukvara
De system som finns idag stödjer virtuell inspektion, men inte automatiserad förberedelse inför automatiserad granskning. Vilket här görs genom grovindeling av data. Erfarenheter från byggarbetsplatsen Vipan i Lund, där mjukvaran Dalux använts, visar att analys av insamlad data inför virtuell inspektion tar mycket tid. Därför finns behov av ett verktyg som snabbt och automatiskt kan förbereda data för katalogisering och granskning, grovgranska och sedan föra in resultat i exempelvis Dalux.
2. Koppling mellan sensordata och progressionsmätning
Nuvarande program för hantering av data från laserskanning och videoinspelning är ofta stora och slutna. En egen pipeline gör det möjligt att experimentera med datastrukturer där sensornära data kan kopplas till byggprojektets framdrift. Ett tidigare examensarbete (SBUF 14115) visade hur punktmoln kunde jämföras direkt mot BIM-modeller. I detta projekt testas en blockbaserad metod, där punktmoln delas upp i mindre enheter (block). Dessa block kan användas både för progressionsmätning och för andra syften, till exempel för att upptäcka hinder i utrymningsvägar.

Pipelinan bygger på Python-skript som arbetar på data lagrad i en enkel mappstruktur. Varje inspektionsrunda får sin egen mapp i denna struktur. Skript läser in filer från en inspektionsmapp och skapar nya utdatafiler i samma mapp. Vid ny körning skrivs tidigare filer över. Skript kan även automatisera körningar över flera inspektionsrundor.

² Alex Junho Lee, et al, Survey of robotics technologies for civil infrastructure inspection, Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, Volume 2, Issue 1, 2023, 100018, ISSN 2772-9915, <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2022.100018>.

- **Punktmoln** från Spot sparas i en undermapp. Varje fil i denna representerar en tidsstämplad lidar-avläsning.
- **Video** från en monterad 360-kamera sparas lokalt i kameran och importeras sedan till inspektionsmappen. Detta möjliggör jämförelser med liknande data från smarta hjälmar (SmartBuild 2022-00098).
- **Lidar-data** lagras via en docker-container utvecklad i ett tidigare examensarbete. Denna sparar punktmoln tillsammans med robotens positionsdata.

En bugg upptäcktes när beräkningspipelinen togs fram. Troligen beror denna på att Spots mjukvara uppdaterats under projektets gång. Buggen yttrar sig så att positionsdata sparas undan mycket mer sällan än önskat. Detta har försvårat sammanläggning av video och punktmoln. Pipelinen har därför kompletterats med metoder för att återskapa robotens position och rörelse baserat på tillgänglig lidar-data, även om precisionen i nuvarande metod visat sig vara för brusig för att automatiskt lösa uppgiften. Ett manuellt verktyg har därför utvecklats för att justera och validera positionsinformation. Figur 2 visar en bild från verktyget där det blå rutnätets position kan justeras för att passa bilden. Även bilden kan justeras genom att flytta tidpunkten för urval. Detta visade sig nyttigt vid omorientering av roboten.

Databehandling i pipeline

1. **Uppackning av punktmoln**
Punktmoln packas upp till enstaka filer, en per lidar-avläsning. Spots interna system placerar automatiskt molnen i samma koordinatsystem, med hög precision.
2. **Synkronisering av sensordata**
Video och lidar-data synkroniseras genom att identifiera start- och stopprörelser. Rörelse kvantifieras med optiskt flöde i video och med avståndsberäkningar mellan punktmoln för lidar-data.
3. **Positionsåterskapande**
Spots position uppskattas genom att identifiera cirkelsegment på golvytor i lidar-data. Metoden fungerar men verkar tyvärr inte ge tillräckligt hög precision för sammanläggning av punktmoln med video, men kräver stora plana ytor och påverkas av att lidar är i rörelse under skanning.
4. **Bortfiltrering av operatör**
Vid operatörsguidning syns operatören ofta som en "svans" i punktmolnet. Olika metoder testats för att filtrera bort dessa punkter, men avvägningar behövs eftersom fasta objekt också kan försvinna vid för aggressiv filtrering.
5. **Upplinjerig över tid**
För att jämföra flera inspektionsrundor behövs ett gemensamt koordinatsystem. Här används ett så kallat *Manhattan-antagande*, där plana ytor antas vara ortogonala för att ta fram ett sådant gemensamt system. På så sätt kan punktmoln från olika rundor linjeras upp mot varandra. Antagandet har även testats för att, med begränsad framgång, identifiera rum utan tillgång till BIM.
6. **Blockindelning och färgläggning**
Punktmolnen delas upp i block. Blocken färgläggs med hjälp av bilder från 360-videon.

Olika metoder har testats för att välja ut bild ur video som sedan projiceras mot blockets ytor. Här spelar precision i robotens position och riktning roll. På grund av buggen i lagring av robotens positionsdata behöver just nu färgsättningen justeras manuellt.

7. Visualisering

För att laborera med 3D-miniatyr för visualisering skapas en blockmodell med pålagda färgbilder. Denna sparas i filformatet GLTF. Formatet gör det möjligt att visa modellen på vanliga datorer utan CAD-program. Filstorlek och visningsprestanda kan förbättras genom att optimera antalet texturer och trianglar.

Den egenutvecklade pipeline gör det möjligt att:

- bearbeta inspektionsdata steg för steg,
- experimentera med datastrukturer för progressionsmätning,
- experimentera med katalogisering av data,
- och experimentera med lättvikliga 3D-modeller för visualisering.

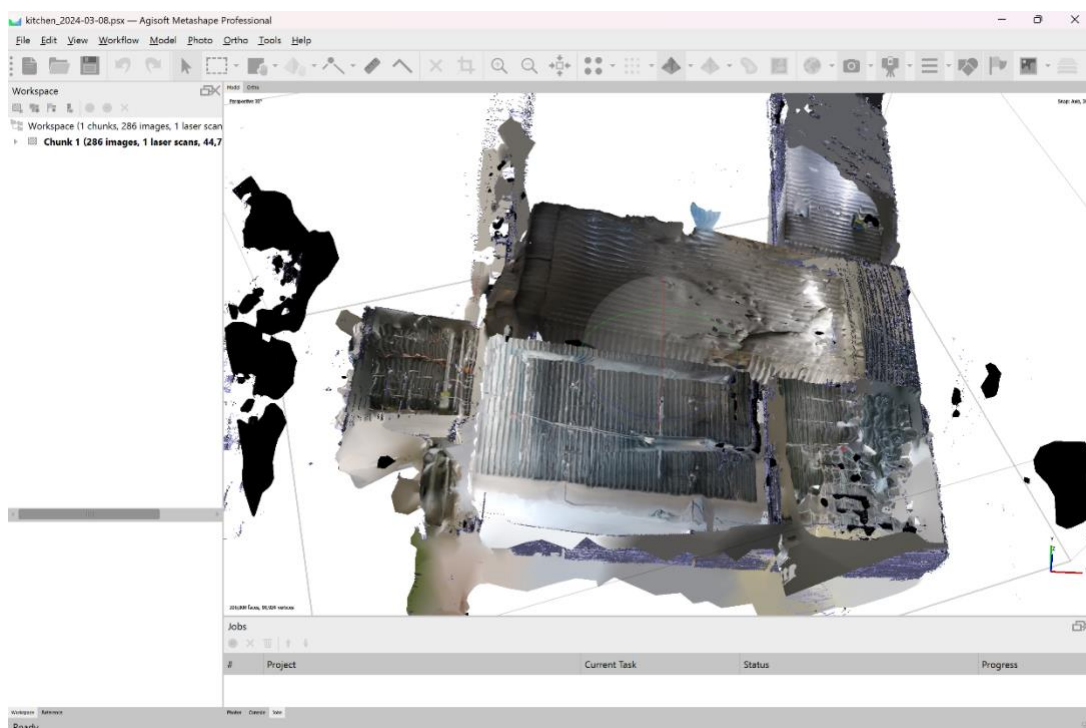
Pipelineens beräkningstid räknas i minuter och detta för ooptimerad Python-kod. För att nyttja tillgänglig historisk data från inspektion på Vipar behövs bättre automatisk metod eller manuellt justeringsförfarande för återskapande av robotposition utredas.

Test av annan mjukvara

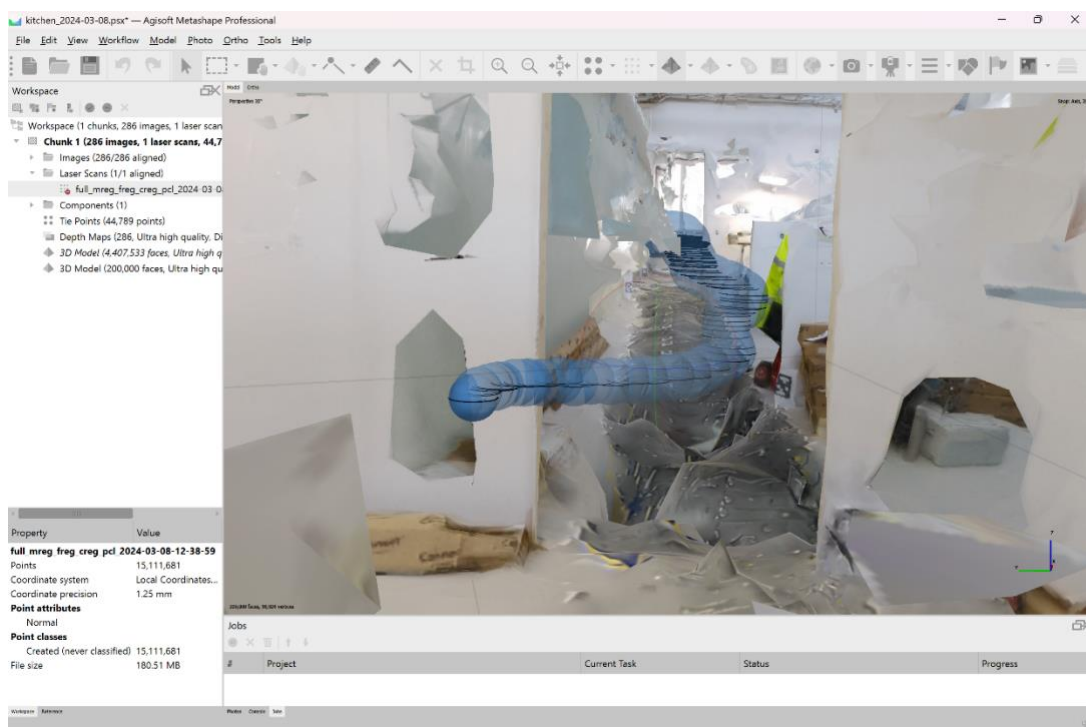
I arbetspaketet testades även en annan mjukvara för att skapa geometriska modeller baserade på video från 360-kamera. Sedan tidigare fanns erfarenhet av Dalux och dess funktioner. Denna gång valdes istället Metashape Pro från AgiSoft³, ett generellt fotogrammetriverktyg som främst används för drönarskanningar utomhus, men som också kan användas i inomhusmiljöer. Figur 8 och 9 visar resultat från behandling av data från en inspektionsrunda.

Erfarenheterna visar att verktyget kräver viss inläring för att konfigureras på rätt sätt. Dessutom tar modellberäkningarna lång tid, ungefär i samma storleksordning som i Dalux. En särskild utmaning uppstod vid väggar med homogena texturer, där det var svårt för mjukvaran att tillförlitligt återskapa geometri.

³ <https://www.agisoft.com/>



Figur 8. Resultat i annat verktyg från beräkning av geometri från rundvandring med 360-kamera. Beräkning assisterad av punktmoln från lidar.



Figur 9. Intern vy från resultat från beräkning av geometri i annat verktyg. De blå sfärerna är utplacerade för att markera robotens bana genom modellen. En operatör har gått bakom roboten. Detta har gjort sönder modellskattningen, framförallt att golvet inte är platt under roboten.

Diskussion

Arbetspaketet mötte flera utmaningar under genomförandefasen. Projektet fördröjdes av sjukdom, tekniska fel på roboten, avslutat arbete på byggarbetsplats samt en bugg i gammal mjukvara. Detta har påverkat möjligheten att fullt ut nå önskade resultat. Därför diskuteras här både genomfört och önskat arbete, tillsammans med motiveringar.

Två viktiga lärdomar identifierades under arbetets genomförande:

- **Lärdom 1:** Punktmoln som samlats in med robotens navigeringslidar har begränsad täckning. Täckning av golv och tak var mindre bra, och väggar täcktes olika mycket beroende på hur nära roboten passerade. En lidar monterad tvärs mot gångriktningen hade troligen gett bättre täckning och bör övervägas i framtiden.
- **Lärdom 2:** 360-kameran integrerades inte med roboten, utan kördes separat. Syftet var att möjliggöra jämförelser med smart hjälm i parallellprojektet SmartBuilt 2022-00098. Erfarenheten visar dock att en integration hade förenklat beräkningspipelinen, minskat behovet av manuell synkronisering och troligen bidragit till att den oönskade buggen upptäckts tidigare.

Utöver detta har testningen halkat efter. Själva beräkningspipelinen⁴ körs på några minuter, men den manuella korrigeringen som nu nyttjas för att korrigera skattning av robotens position i historisk data har gjort tester tidskrävande. Därför är, till exempel, just nu jämförelser mellan olika inspektionsrundor kostsamma. Det krävs antingen en bättre skattningsmodell eller ett effektivare manuellt korrigeringsförfarande. Dessutom behöver implementationen för datainfångning rättas till så att positionsdata sparas undan framgent.

Önskade tester som inte genomförts:

- revidering av information i digitalt system (t.ex. Dalux),
- jämförelser mellan två eller flera inspektionsrundor med framtagning av PoC-metrik,
- variation i inspektionsrutt för bättre täckning i insamlad data,
- katalogisering och lagring av grovindlad data,
- och rapporteringstest mot arbetsplatspersonal.

Slutligen hade test av automatisk granskning av block med AI-teknik varit trevligt att utreda, särskilt om historiskt insamlad data blir lätt tillgänglig. Granskningsarbete har påbörjats i ett tidigare examensarbete (*"Utvärdering av Spot som ett instrument för autonom datainsamling"*, Zarkout & Lindberg, 2022)⁵, då utan tillgång till grovindlad data.

Den föreslagna grovindelningen av data som förberedelse inför granskning verkar lovande. Blockindelning gör det möjligt att lagra och söka data som ett förberedande steg innan granskning. Vid upprepade inspektioner skapas en tidslinje med data kopplad till block. Enheten block lämpar sig att jämföra inspektionsdata kvantitativt, det går att koppla data till BIM och, i viss mån, direkt visualisera data och avvikelser som block, kanske med färgkodning. Blockens innehåll kan tänkas användas som grund för revideringar mot andra digitala system innehållande, till exempel, 3D-baserad APD-plan.

⁴ <https://git.cs.lth.se/construction-robotics/spot-manhattan-visualization>, 2025-09-17 – ej förberedd för publik exponering.

⁵ <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9127394>

Slutsatser

- Robotens navigeringslidar ger begränsad täckning. En alternativ sensororientering kan övervägas för bättre täckning.
- Grovindeling av data till block som ett förberedande steg inför granskning kan på sikt användas för att bygga databaser över inspektionsdata och underlätta automatiska granskningsprocesser.
 - Block möjliggör framtagning av automatiskt geometriskt baserad PoC-metrik.
 - Block möjliggör även ett grovt granskningsförfarande.
- Den egenutvecklade beräkningspipelinen gör det möjligt att:
 - bearbeta inspektionsdata steg för steg,
 - experimentera med datastrukturer för progressionsmätning,
 - experimentera med katalogisering av data,
 - och experimentera med lättvikliga 3D-modeller för visualisering.

BEVAKNING

Arbetspaketet handlar om att undersöka möjligheter i uppdragets omfattning vid autonom rundvandring. Går det att nå synergier genom att förena olika uppdrag under en rundvandring. I detta arbetspaket har arbete utförts som förbereder roboten Spot för bevakningsuppdrag. Dels har en värmekamera monterats på roboten, dels har robotens funktionalitet utökats så att den fått förmåga att avvika från sin planerade rutt i syfte att närma sig platser där den upptäckt avvikelser.

De två frågorna som ställts i arbetspaketet för att driva arbetet har modifierats något under arbetets gång. De två frågorna:

- Test detektion av öppna dörrar och fönster vid rundvandring.
- Test detektion av saknade föremål vid rundvandring.
- har under arbetet utvecklats mot att undersöka:
- Kan robotens autonoma inspektionstur ändras under uppdragets genomförande för att undersöka anomalier närmare ifall sådana upptäcks, så som att AI upptäcker en anomali i en värmekamerabild.

Skäl till detta är att vi ville undersöka värmekamera som sensor på Spot. Då arbetet utfördes under varma vårdagar lämpade sig värmekamera dåligt för att detektera öppna dörrar och fönster. Som alternativ valdes då att fokusera på människor vars kroppsvärme avtecknar sig distinkt även vid varma dagar. Fråga 2, detektion av saknade föremål vid rundvandring, visade sig stämma ganska bra med detektion av lösa föremål i rum från arbetspaket 2. Arbetspaket 3 valde i detta läge att avvakta resultat från arbetspaket 2 för ursprungsfrågorna och i detta arbetspaket fokusera på robotens funktionalitet i bevakningsuppdraget, specifikt att avvika från planerad autonom rutt på ett kontrollerat sätt. Att kunna förändra rutten under en autonom rundvandring har betydelse även för inspektion, till exempel att kunna gå förbi blockerade utrymningsvägar och blockerade dörrar.

Arbetet i arbetspaket 3 har till stor del genomförts som ett examensarbete, Robotiserade rundvandringar i säkerhetssystem (2024) av Ella Thunborg och Johanna Wedding. Examensarbetarna har utvecklat och utvärderat robotens förmåga att autonomt genomföra patrullering på byggarbetsplats, detektera avvikelser med möjlighet till integration i ett övervakningssystem för att larma vid upptäckta problem. Autonoma bevakningsuppdrag passar byggarbetsplatser där bevakningsföretag kan ha svårt att patrullera och fast

kameraövervakning kan vara svår att implementera. Autonoma uppdrag passar uppdragets karaktär, som är att upptäcka och larma för anomalier vid udda tidpunkter. Till skillnad från konventionella kameror presterar då termiska kameror utmärkt i mörker och vid dålig sikt, vilket gör dem idealiska för dåligt belysta områden. Genom att kombinera termiska kameror med videoanalys kan larmfunktioner erbjudas som att upptäcka personer i mörka områden och då larma säkerhetspersonal. För byggsplats kan även brandhärddar och köldbryggor upptäckas. Något att ta i beaktande vid autonom rundvandring är det snäva synfältet och låga upplösning som ofta erbjuds från termiska kameror.



Figur 10. Robot Spot utrustad med värmekamera monterad i arbetspaketet. Kameran är monterad under robotarmens grippdon och förbunden med en kamera-controller med kabelföring längs robotarmen. Syftet med monteringen är att tillåta "svepande" armrörelser för att öka synfältet.

Förändring av rutt vid larm

För att gå närmare vid en upptäckt krävs att robotens rutt förändras. Det vore även bra om en ny rutt var förberedd så att den uppfyller krav och önskemål var roboten får lov att befinna sig på arbetsplatsen. Metodiken som togs fram för att åstadkomma detta består av ett antal steg. För att underlätta upprepning nyttjas i stor utsträckning skript som finns tillgängliga publikt .

Det första steget är att spela in en karta över hela området inklusive områden utanför vanlig rutt. I detta steg guidas roboten manuellt. En förutsättning för autonom rundvandring med Spot är att omgivningen är annoterad med markörer , dessa utgörs av AprilTags som liknar QR-koder. Roboten behöver ha en markör inom synhåll för att kunna initiera sin position. Roboten bör därefter med jämna mellanrum ha en markör i sikte under rundvandringen. Roboten behöver skapa kartpunkter under inspelning av karta. Det är längs kartpunkter rutten definieras. Rekommendationen är att nyttja skriptet `Recording_Command_Line` i detta syfte. Detta skript nyttjar en intern tjänst i roboten, `GraphNavRecordingService`, för att skapa en karta med kartpunkter. Den inspelade kartan kan sedan användas för att lokalisera roboten inom det kartlagda området. När kartläggningen är klar kan roboten autonomt navigera mellan kartpunkter. Värt att nämna är att kartan behöver laddas ner till fil från Spot för att sparas permanent.

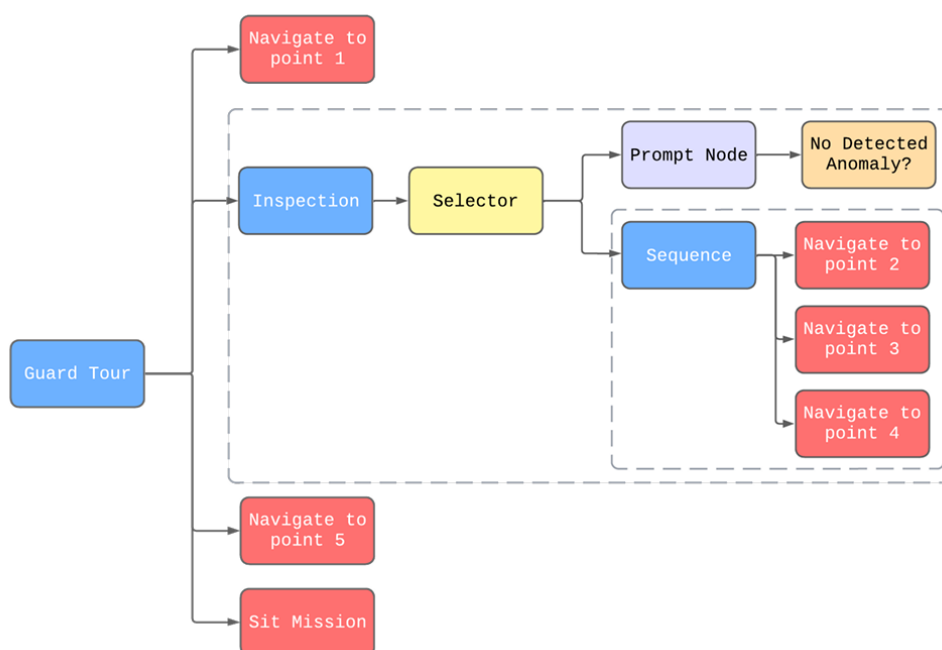
Nästa steg är att avgöra var avvikelser från den ursprungliga rutten ska vara möjliga. Tanken är att utifrån inspektionsrutt och tillgängliga kartpunkter samt egenskaper såsom begränsade eller förbjudna områden, korsningar med flera möjliga vägar samt specifika inspektionspunkter på kartan, skapa nya avvikande rutter i förväg i syfte att nå skilda platser. I detta steg är tanken att potentiella avvikande rutter skapas automatiskt.

För att avgöra vilken rutt som ska väljas under rundvandring nyttjas ett beteendeträd. Detta är en robot-specifik beskrivning som används för att styra beteenden hos robotar. Den består av noder som representerar olika handlingar eller beslut. Utifrån givna avvikande rutter och beslutspunkter för avvikelser skapas ett beteendeträd som representerar rundvandringen med möjliga avvikelser. Det är sedan denna beskrivning som utgör robotens uppdragsbeskrivning. Figur 2 illustrerar hur detta kan se ut i ett beteendeträd.

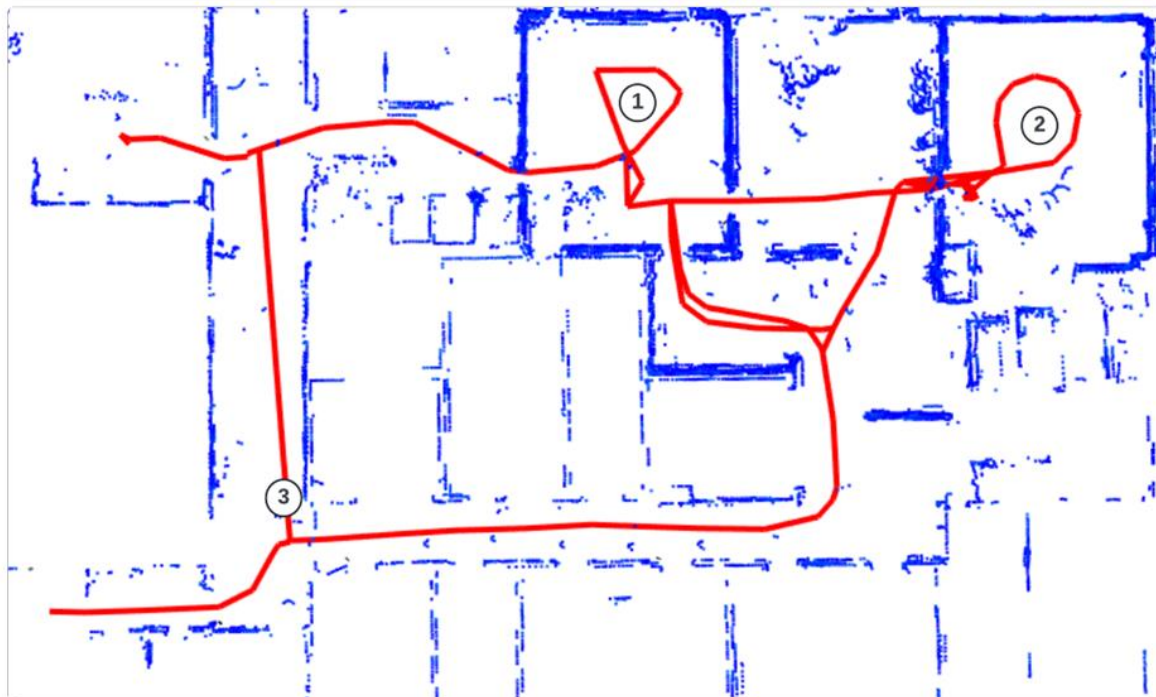
Metoden består alltså av följande steg:

- Annotera området med markörer för robot.
- Genomför en guidad heltäckande rundvandring med roboten.
- Välj ut standardrutt, potentiellt genom att klicka i BIM enligt arbetspaket 4.
- Skapa möjliga avvikelser automatiskt utifrån standardrutt, insamlad data från guidad rundvandring och övrig tillgänglig information, potentiellt från BIM.

Examensarbetet har utvecklat och utvärderat metodens genomförbarhet, men arbete återstår, då främst inom automatgenerering av avvikande rutter och uthämtning av information från BIM.



Figur 11. Bild från examensarbetet som visar grund för beteendeträd med avvikande rutter. Normal rutt beskrivs i den första nivån och består av navigera till-noder. Inspektionsnoden utgör en beslutspunkt för avvikande rutt. Selektorn undersöker om larm inträffat och isåfall avviker roboten till förberedd avvikande rutt för att titta närmare på larmet.



Figur 12. Inspelad rutt på Vippan i Lund med tillagda avvikelser (1,2 = gå in i rum, 3 = gå in i korridor) vid numrerade beslutspunkter.

Larm

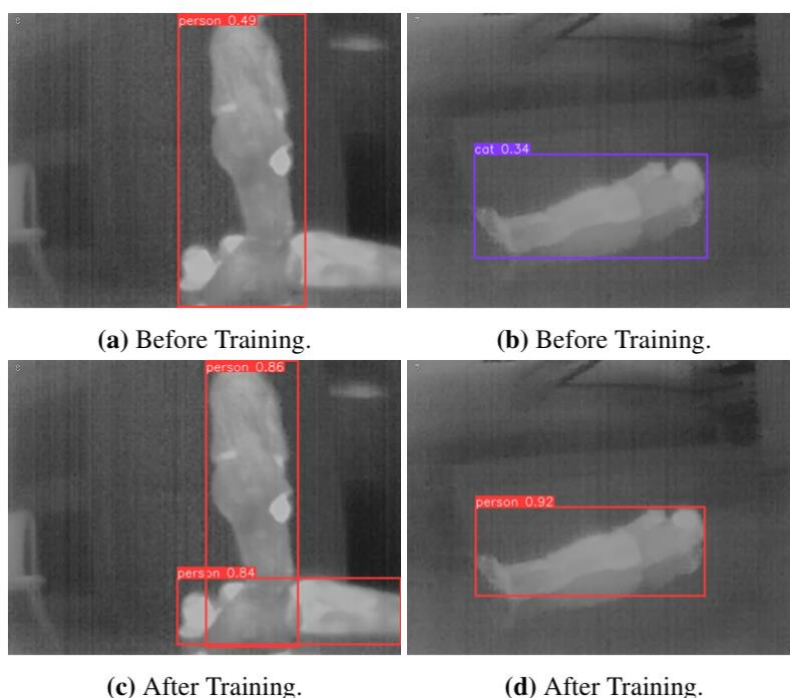
I arbetet utrustades Spot med en extra sensor, en värmekamera. Avsikten var att nyttja denna för att identifiera öppna dörrar och fönster genom att detektera kalla områden under vintertid när värmeförhållanden skiljer sig tydligt mellan inomhus- och utomhusmiljöer. Nu kom testerna i examensarbetet att ske under vår/sommar. Av detta skäl genomfördes detektion på kroppar istället för dörrar.



Figur 13. Värmekameras placering på Spot.

Möjligheter att träna AI med data från värmekamera utvärderades med AI-modellen YOLOv8. YOLO (You Only Look Once) är en AI-modell för objekt-detektering i bilder och video. Den

analyserar hela bilden i ett enda steg ("look once") och förutspår både vad objekten är och var de finns. För att träna denna modell nyttjades ett eget dataset enligt nedan metod. Det skapade datasetet innehåller bilder från termiska videor med personer i olika kroppsställningar. Det innehåller även olika bakgrunder och flera personer samtidigt. Datasetet är sammansatt av videor från tre olika källor. En av bildernas källor kommer från videor som spelats in i robotlab samt från byggarbetsplats. Dessutom har Kaggle AAU TIR-dataset och dess termiska bilder använts, liksom FLIR ADAS-dataset. Detta skapade dataset innehåller endast en klass, vilket är "person"-klassen. Verktöget Roboflow nyttjades för att annotera datasetet inför träning av YOLO-modellen. Figur 5, hämtad från examensarbetet, visar var YOLO presterade mindre bra. Den tränade modellen presterar med 80% noggrannhet. Identifiering av ovanliga eller felaktiga kroppsställningar kan potentiellt larma för olyckor eller farliga situationer, även om tänkt nyttjande av robot är efter arbetstid.



Figur 14. YOLO-modellen var i sin ursprungliga träning dålig på att identifiera liggande människor.

Slutsatser

Arbetspaketet utreder hur roboten Spot kan genomföra autonoma patruller för att upptäcka avvikelser i miljön. Spot nyttjades redan för inspektion på byggarbetsplatsen. En fråga som ställts i arbetet är om roboten förutom inspektion kan ta på sig andra uppdrag under en rundvandring, som bevakning. Slutsatsen är att detta är möjligt men troligen behövs en utökad frihet i robotens förutbestämda inspektionsrutt. Det Spot kan är att förflytta sig autonomt längs förprogrammerade rutter och anpassa sin väg inom gränser vid hinder eller förändringar i miljön. Men vid upptäckt av en anomali konstaterade examensarbetet att roboten kan behöva avvika från sin förutbestämda rutt för att granska anomalin närmare. Arbetsspaketet visar på en metod för hur detta kan göras.

I arbetet utrustades Spot med en extra sensor, en värmekamera. Avsikten var att nyttja denna för att identifiera öppna dörrar och fönster genom att detektera kalla områden under vintertid när värmeförhållanden skiljer sig tydligt mellan inomhus- och utomhusmiljöer. Nu kom testerna i

examensarbetet att ske under vår/sommar. Av detta skäl genomfördes detektion på kroppar istället för dörrar.

Speciellt för den valda värmekameran var det begränsade synfältet. Därför monterades kameran på robotens arm med tanke att utöka synfältet genom att svepa med armen. Denna teknik var påtänkt men blev inte implementerad och utvärderad i arbetet.

Bevakningsrutter testades i två typer av miljöer: Maskinbyggnaden på LTH och Vipan byggarbetsplats i Lund.

Arbetet visar att det finns en koppling mellan progressionsmätning och bevakning, vilket skapar synergier där samma robot kan användas för flera ändamål.

INSPEKTIONSRUTTER TILL AUTONOM UTRUSTNING

Byggsektorn rör sig mot Construction 4.0, där ökad uppkoppling och automatisering är centrala drivkrafter. Punktmoln kan i dag användas för att skapa och uppdatera digitala modeller av byggarbetsplatser, men när detta genomförs sker det genom ett fåtal skanningar av platsen. Skanningar kräver mycket arbete. Frågan är om denna uppgift kan automatiseras och då genomföras mer frekvent – och därigenom göra digital tillgång på data mer tillförlitlig och användbar i produktionen.

Syftet med detta arbetspaket har varit att möjliggöra en mer effektiv koppling mellan digital byggmodell (BIM) och robotens inspektionsrutt – med målet att minska behovet av manuell medvandring med roboten Spot från Boston Dynamics vid varje ruttuppdatering.

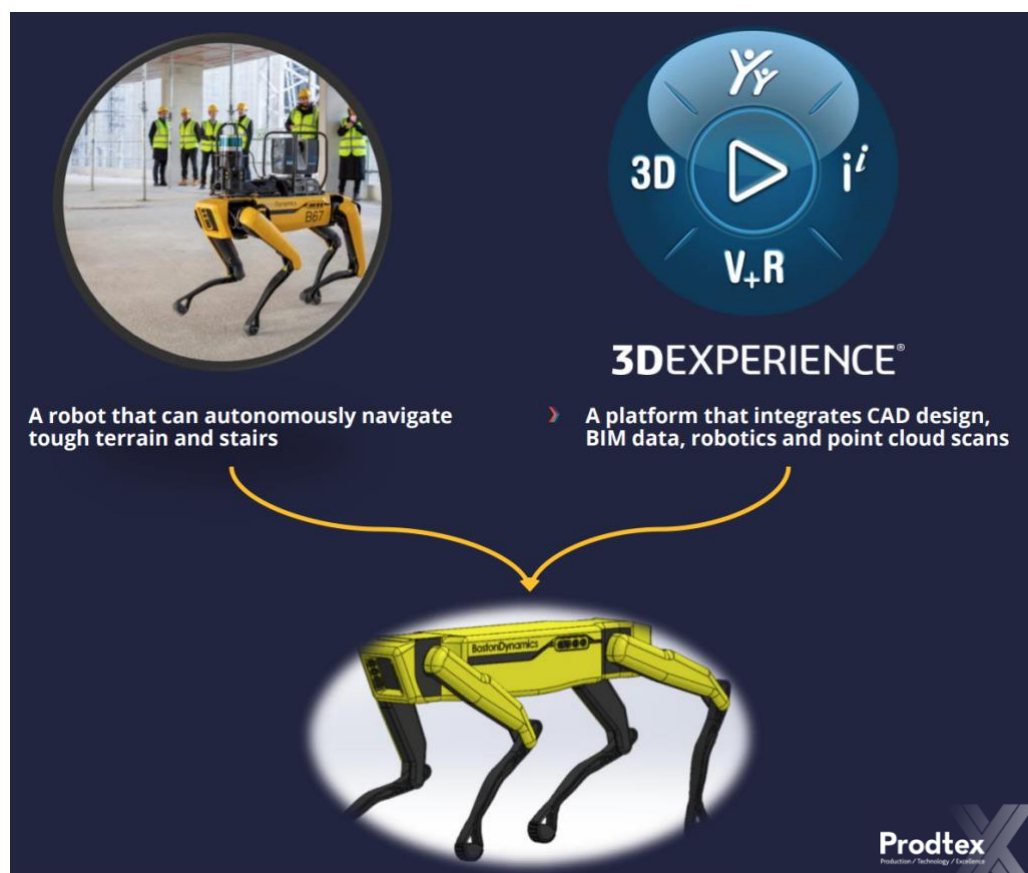


Bild 15. Automatisering av inspektionsrutt från CAD model/BIM data.

Spot kräver i nuläget att en operatör går med roboten längs hela önskade inspektionsrutten för att uppdatera robotens interna karta, i form av ett punktmoln. Detta punktmoln kan även användas för att revidera, mäta in och validera digitala modeller av byggelement. Vid förändringar i byggmiljön, vilket är vanligt under intensiva byggfaser, visar vår erfarenhet att det krävs frekvent revidering av inspektionsrutt för att hålla relevanta delar av byggmodellen uppdaterad. Detta moment kan bli mycket tidskrävande och skapa flaskhalsar. I detta arbetspaket har vi undersökt hur vi kan automatisera skapandet av inspektionsrutter genom att definiera rutterna direkt i en BIM-modell. Resultatet är ett arbetsflöde som innebär att en användare skapar en virtuell inspektionsrunda genom att klicka ut mål direkt i en BIM-modell som sedan resulterar i instruktioner läsbara för operatör och robot.

Som verktyg för detta arbete har vi använt 3DExperience, där ett Spot-tillägg med kapacitet att modellera både robotarbete och rörelsebanor tagits fram. BIM-modellen från Vipan har därefter importerats till tillägget och där har inspektionsrutter definierats.

Projektpartnern med erfarenhet av 3DExperience, ProdTex, vände sig inledningsvis till Boston Dynamics för att få stöd i hur autonoma inspektionsrutter skulle kunna definieras via modeller. Men sådant arbete låg tyvärr utanför Boston Dynamics ansvarsområde. Därefter kontaktades Dassault Systèmes, som äger verktyget 3D Experience. Tillsammans med Dassault Systèmes utvecklades en metod för att bereda inspektionsrutter för Spot för användning i byggmiljö, som därefter gjorts tillgänglig som ett tillägg till applikationen 3DExperience.

Spots navigation bygger på .walk-filer, som innehåller interna kartor. Dessa kan laddas upp direkt till Spot eller skapas genom att manuellt guida roboten på plats. Efter sådan guidning kan roboten navigera autonomt på byggarbetsplatsen enligt samma metodik som tagits fram i arbetspaketet för bevakning.

I workshops med Dassault Systèmes diskuterades möjliga lösningar, hur Spot är programmerad samt hur integrationen med en digital tvilling i 3D Experience kan ske. Spot definierades därefter i 3DX-modeller. Även om modeller av roboten finns tillgängliga via CadGrab, behövde en egen modell tas fram för kommersiellt bruk. Under utvecklingsfasen användes en enklare representation som robotmodell.

Med hjälp av Delmia i 3D Experience och utvecklat Spot-tillägg kunde virtuella rutter skapas manuellt genom att klicka fram kartpunkter i BIM. Det fanns även möjlighet att importera BIM-ritningar till sessionen och på så sätt kombinera olika komponenter för att definiera och testa inspektionsrutter.

Två olika tillvägagångssätt för kartpunktsnavigering har därefter utforskats, båda baserade på termer i Spots SDK ("waypoints" och "edges"). Gemensamt för båda metoderna är att de kräver en .walk-fil som indata för att roboten ska kunna navigera.



Bild 16. Skärmbild från 3DEXperience där BIM-modellen för Vippan har importerats och rutt definierats för roboten.

Slutsatser:

Det vi kan göra

- Sammanfoga BIM-data med en digital modell av Spot och navigera den i en virtuell tvilling.
(*Detta innebär att inspektionsrutter kan testas digitalt innan de körs på byggarbetsplatsen.*)
- Översätta kartpunkter från 3D Experience till rutter som Spot förstår.
(*information och kommandon i 3DX kan omvandlas till kod som Spot förstår.*)
- Ladda upp den genererade koden till Spot för felsökning och verifiering.
(*Det gör det möjligt att prova rutterna i verkligheten och säkerställa att de fungerar.*)

Det vi ännu inte vet om vi kan göra

- Utnyttja manipulatorarmen.
(*Robotarmen har potential för uppgifter som utsättning eller enklare interaktioner, men detta är ännu oprövat i projektet.*)
- Ha en "live-version" av Spot i 3D.
(*Målet är att kunna se robotens faktiska rörelser och status i realtid i den digitala tvillingen*)

Övergripande slutsats

Projektet visar att autonom insamling av data med robot kan nyttjas både för progressionsmätning och bevakning, och att sådan data kan struktureras och filtreras för att bli hanterbar och användbar för arbetsplatspersonal. Genom att integrera robotdata med BIM, och utveckla pipelines för jämförelse och visualisering, har projektet lagt en grund för framtida

implementeringar av automatiserad återkoppling på byggarbetsplatser. Projektet har undersökt tre aspekter som inte tagits upp i tidigare projekt

Tillgodogörande av data mot digitala system och arbetsplatspersonal

Projektet har visat på möjligheter för hur inspektionsdata från roboten kan göras tillgänglig för digitala system och personal på arbetsplatsen. Projektet har utvärderat en metod för geometrisk grovindeling av insamlad data. Sådan grovindeling kan ligga till grund för databaser över inspektionsdata, och stödja automatiserade granskningsprocesser. Grovindelingen möjliggör dessutom en första grovgranskning och framtagning av en automatiskt genererad PoC-metrik baserad på geometri. En del av arbetet har varit utvecklingen av en egen beräkningspipeline, vilken gör det möjligt att laborera med bearbetning av inspektionsdata. Genom denna pipeline har projektet kunnat experimentera med progressionsmätning, olika metoder för katalogisering av data samt framställning av lättviktiga 3D-modeller som kan användas för visualisering.

Alternativa uppdrag

Projektet har också undersökt om roboten Spot, som använts för inspektion på byggarbetsplatser, kan utföra ytterligare uppdrag såsom bevakning under sina rundvandringar. Slutsatsen är att detta är möjligt, men att det kräver en ökad flexibilitet i robotens förutbestämda inspektionsrutter. Projektet presenterar en metod för hur detta kan genomföras. I arbetet utrustades Spot även med en värmekamera i syfte att identifiera temperaturkontraster i inomhus- och utomhusmiljöer. Resultaten pekar på att det finns synergier mellan progressionsmätning och bevakning, vilket innebär att samma robot kan användas för flera typer av uppdrag.

Inspektionsrutter från BIM/CAD-modell

Projektet har även tagit upp möjligheten att definiera inspektionsrutter från digitala modeller av byggarbetsplatsen. Projektet har utvärderat att i ett digitalt verktyg, 3Dexperience, visualisera BIM-data med en modell av Spot för att definiera och simulera inspektionsrutter virtuellt innan de utförs på en faktisk byggarbetsplats. Definierade rutter har översatts till roboten Spot i syfte att omvandla data från BIM-miljön till körbar beskrivning för roboten, dock ännu inte på kartnivå. Samtidigt kvarstår vissa frågor som ännu inte har besvarats. Det finns en potential i att utnyttja robotens manipulatorarm för uppgifter som utsättning eller enklare interaktioner, men detta har ännu inte prövats i projektet.