

PROJEKTNR. 14187

Interaktiv byggrobotik

3d-printning, adaption och sensoråterkoppling i robotiserade byggprocesser

David Andréen
Lunds universitet

2026-04-08



Förord

Detta projekt har genomförts inom ramen för Centrum för Byggrobotik vid Lunds Tekniska Högskola i samverkan med PEAB och Cognibotics. Huvuddelen av arbetet har utförts av doktorand Anton Tetov Johansson, med David Andréen, docent vid institutionen för Arkitektur och Byggd Miljö, som projektledare och huvudförfattare till rapporten.

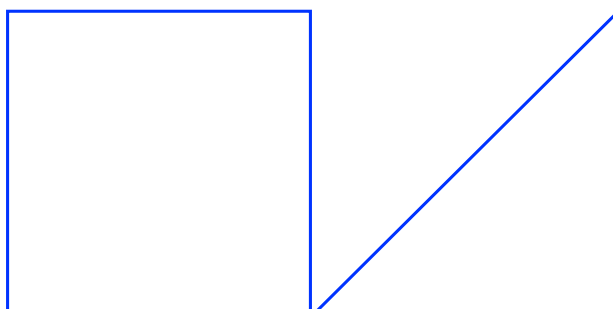
Medverkande har även varit Mathias Haage (Datavetenskap), Björn Olofsson (Reglerteknik) och Per-Johan Dahl (Arkitektur och Byggd Miljö). Projektet har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och syftar till att utveckla metoder och verktyg för interaktiv, sensoråterkopplad 3D-printning i byggsammanhang. Det utgör första halvan av ett doktorandprojekt som planeras fortsätta i ytterligare två år.

Vi vill rikta ett varmt tack till alla medverkande forskare, tekniker och samarbetspartners för deras bidrag och engagemang. Ett särskilt tack till Lunds kommun som upplåtit plats för projektets mobila robotlabb, till Jonas Runberger som varit opponent vid doktorandens 50% seminarium, samt till Paul Nicholas (Center for Information Technology in Architecture, CITA, Köpenhamn) som medverkat som opponent vid doktorandens startseminarium. Tack även till referensgruppen: Martin Frödeberg (Tyréns), Petra Jenning (FOJAB), Johan Jönsson (Brukspecialisten) och Nils Rydén (PEAB), för deras värdefulla insikter och diskussioner.

Lund, april 2026

David Andréen

Projektledare



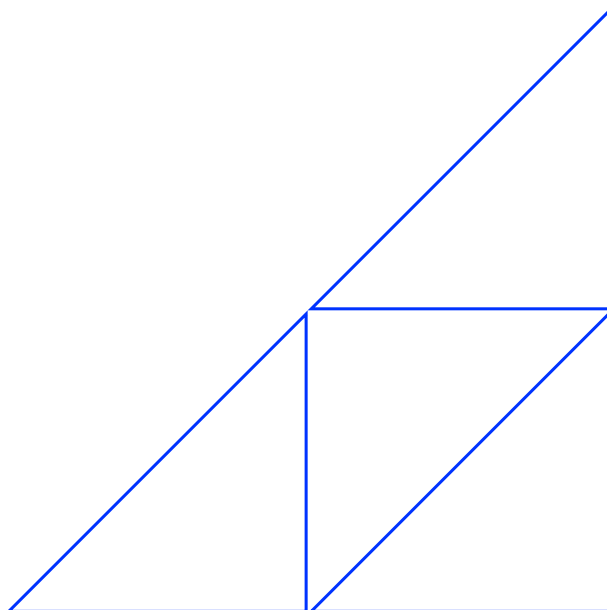
Sammanfattning

Projektet har under sin första fas utvecklat och testat en teknikplattform för interaktiv, sensorstyrd 3D-printning med robotik i byggsammanhang. Fokus har varit på alternativa och klimatsmarta material såsom obränd lera och återbrukad sten. Arbetet har bedrivits som ett tvärvetenskapligt samarbete mellan institutionerna Arkitektur och Byggd Miljö, Datavetenskap och Reglerteknik vid Lunds Tekniska Högskola, inom ramen för Centrum för Byggrobotik.

Genom en kombination av materialexperiment, maskinseende, digitala tvillingar och adaptiv robotstyrning har vi demonstrerat hur tekniken kan hantera oregelbundna material och komplexa byggförhållanden. Två fullskaliga demonstrationsprototyper har producerats, kompletterat med ett stort antal småskaliga tester för att optimera materialblandningar och processparametrar.

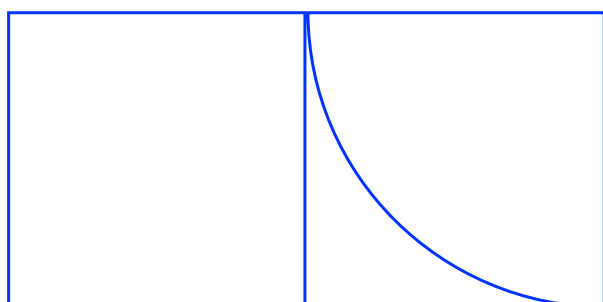
Projektet har mött och löst betydande tekniska och logistiska utmaningar, bland annat utveckling av specialanpassad lerextruder, etablering av mobilt utomhuslaboratorium samt förbättring av sensorkalibrering och datainsamling. Resultaten visar att tekniken är genomförbar och har potential att möjliggöra byggande med lokala, återbrukade material på ett estetiskt och hållbart sätt.

Nästa fas av projektet kommer att fokusera på kvantifiering av processprestanda, publika demonstrationer och fortsatt forskning fram till kommersiell tillämpning.



Innehåll

1. Bakgrund	5
1.1 Additiv tillverkning i byggsektorn	5
1.2 Digital tillverkning med lerbaserade material	5
1.3 Sensoråterkoppling och adaptiv styrning	5
1.4 Digitala tvillingar i byggproduktion	6
1.5 Projektets positionering	6
2. Syfte	7
3. Metodik	8
4. Utförda undersökningar	10
4.1 Förberedande utforskande	10
4.2 Iterativ prototyputveckling	11
4.3 Utmaningar och svårigheter	13
5. Doktorandens progression och resultat i relation till licentiatnivå	14
6. Resultat, slutsatser och fortsatt arbete	15
Litteraturlista	16



1. Bakgrund

Byggsektorn står inför stora utmaningar när det gäller att minska klimatpåverkan, öka resurseffektiviteten och samtidigt möta krav på kvalitet och estetik. Digitalisering och automatisering har under det senaste decenniet lyfts fram som centrala verktyg för att nå dessa mål och i internationella forskningsmiljöer (så som NCCR Digital Fabrication, ETH Zürich och IntCDC, Stuttgart Universitetet) är dessa ämnen högt prioriterade [1][2][3], även om implementeringen i praktiken fortfarande är begränsad.

Ett särskilt intressant område är robotiserad, additiv tillverkning i byggskedet, där byggnadsdelar tillverkas direkt på plats eller i närhet av byggarbetsplatsen. Detta möjliggör kortare leveranskedjor, användning av lokala och återbrukade material, och högre grad av formmässig frihet.

1.1 Additiv tillverkning i byggsektorn

Forskning och industriella tillämpningar av 3D-printning i byggsektorn har hittills dominerats av betongbaserade processer. Betong-3D-printning har nått kommersiell mognad med system för platsgjutning och prefabricering [4]. Parallellt utvecklas tekniker som Shotcrete 3D Printing (SC3DP), där våtsprutad betong läggs lager-för-lager med potential att skapa slanka, armerade fri-formselement[5]. Nyare studier har dokumenterat fullskaliga SC3DP-demonstratorer och analyserat processparametrar som munstycksgeometri och strängtvärsnitt, vilket visar hur materialprocessens dynamik kan styras för kvalitet och bärformåga[6].

1.2 Digital tillverkning med lerbaserade material

Under de senaste fem åren har ett växande antal forskningsmiljöer och småföretag experimenterat med robotiserad lerutskrift. Projekt som "Clay Robotic Fabrication" vid ETH Zürich och "Digital Earthen Architecture" vid IAAC i Barcelona har visat hur obrända, lerbaserade material kan formas med hög precision och integreras i arkitektoniska konstruktioner[7]. Dessa initiativ belyser materialets fördelar – lågt klimatavtryck, återanvändbarhet och goda inomhusklimategenskaper – men också tekniska utmaningar som sprickbildning vid torkning, materialvariation och begränsad strukturell hållfasthet[8]. I många fall är processerna starkt beroende av materialtillstånd (fukthalt, viskositet) och underlagets topologi, vilket gör adaptiv styrning och feedback nödvändiga för robusthet.

1.3 Sensoråterkoppling och adaptiv styrning

För att hantera variationer i material och omgivningsförhållanden har forskningen inom additiv tillverkning alltmer fokuserat på sensoråterkoppling och adaptiv styrning. Genom maskinseende, fotogrammetri och realtidsdata kan avvikelser i den byggda geometrin detekteras och kompenseras under pågående process [9] [10]. Inom byggrobotik är detta område ännu i sin linda, och de flesta befintliga system förlitar sig på förprogrammerade banor och statistiska materialmodeller.

1.4 Digitala tvillingar i byggproduktion

Konceptet med digitala tvillingar – en virtuell representation av det fysiska objektet som kontinuerligt uppdateras med sensordata – används idag främst i drift- och underhållsskeden av byggnader. Att implementera digitala tvillingar direkt i byggproduktionen kan ge betydande fördelar: ökad precision, bättre dokumentation för förvaltning, och möjlighet att optimera processer i realtid.

1.5 Projektets positionering

Detta projekt adresserar ett forskningsgap i skärningspunkten mellan robotiserad additiv tillverkning, lerbaserade material, sensoråterkoppling och digitala tvillingar. Medan mycket av den internationella forskningen inom bygg-3D-printning hittills har fokuserat på cementbaserade material och statiska, förprogrammerade processer, tar detta projekt ett steg vidare genom att integrera realtidsdata och adaptiv styrning i själva byggskedet.

Internationella projekt har visat att robotiserad lerutskrift är möjlig på laboratorienivå, men har ofta arbetat under kontrollerade förhållanden med homogena materialblandningar. På samma sätt har forskningsprojekt inom digitala tvillingar i byggsektorn fokuserat på drift och förvaltning snarare än produktion. Det saknas därmed ett etablerat ramverk för hur dessa teknologier kan kombineras för att hantera ostrukturerade och dynamiska miljöer som en byggarbetsplats utgör.

Projektets metodik skiljer sig från tidigare arbeten genom att:

- Integrerad "material-i-loopen"-process i utomhusmiljö: från scanning (fotogrammetri/RGB-D) till digital tvilling och adaptiv utskrift på ojämna ytor.
- Samverkan lera–sten i robotiserad 3D-utskrift: hantering av främmande objekt och variabel geometri i realtid, med siktet på reparation/påbyggnad.
- DT-styrd banplanering kopplad till processparametrar (lagerhöjd, extruderingsvolym, TCP-hastighet), i linje med pågående internationell forskning men med fokus på on-site-robusthet och hållbarhetsnytta.

Tillsammans motiverar detta projektets forskningsfrågor om hur designintention, världsmodell (digital tvilling) och sensordata kan knytas samman i en kontinuerlig återkopplingsring som tillåter autonom, säker och resurseffektiv anpassning av 3D-printning med icke-standardiserade material.

2. Syfte

Syftet med projektet var dels att utveckla kunskap och tekniska lösningar för att möjliggöra interaktiv, sensorstyrd 3D-printning med robotik i byggsammanhang, särskilt med alternativa och klimatsmarta material såsom obränd lera och återbrukad sten. Målet var att visa hur digitala verktyg och återkopplade processer kan integreras i byggproduktion för att öka effektiviteten, flexibiliteten och hållbarheten.

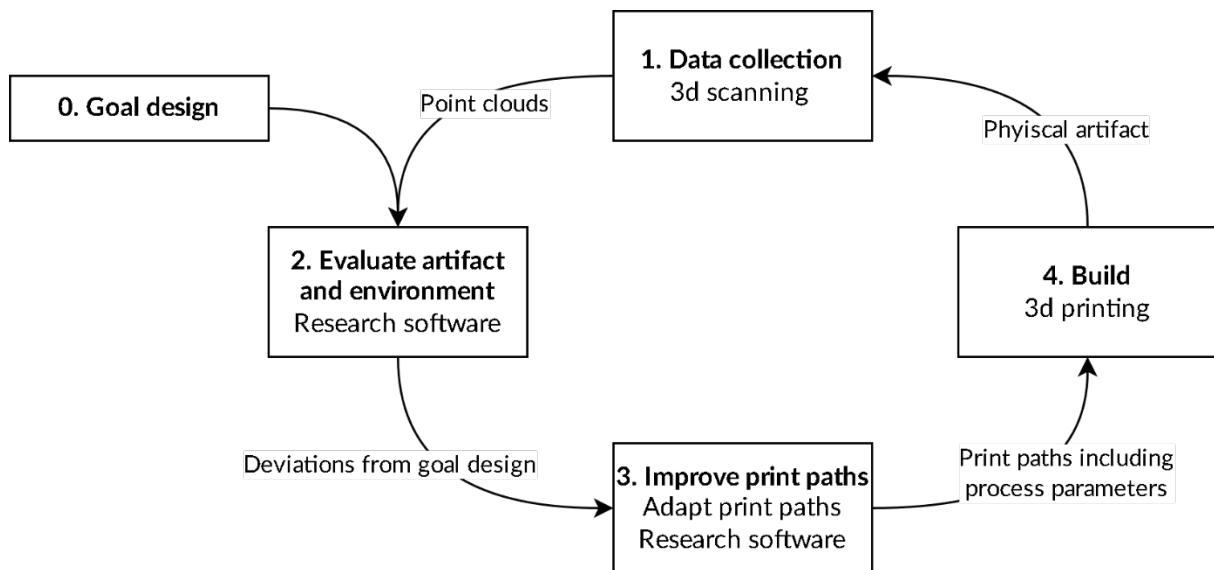
Ett ytterligare syfte var att stärka den forskningsmiljö som finns vid LTH genom Centrum för Byggrobotik, och att utveckla kompetens och samarbeten mellan institutionerna Arkitektur och Byggd Miljö, Datavetenskap och Reglerteknik. På så sätt kan regionens och Sveriges förmåga att möta framtidens byggutmaningar stärkas, och konkurrenskraften på en alltmer digitaliserad marknad förbättras.

Centrum för Byggrobotik strävar efter att skapa en tvärvetenskaplig miljö där näringsliv, forskare och studenter har en gemensam arena för att utforska och utveckla framtidens byggindustri. Doktorander utgör en central del av detta arbete, då de kan driva långsiktig forskning och bygga upp spetskompetens.

Projektets första steg har nu avslutats med denna slutrapport, och nästa fas kommer att fokusera på att använda den metodik som utvecklats, publicera resultat, genomföra demonstrationer och slutföra doktorandutbildningen fram till disputation.

3. Metodik

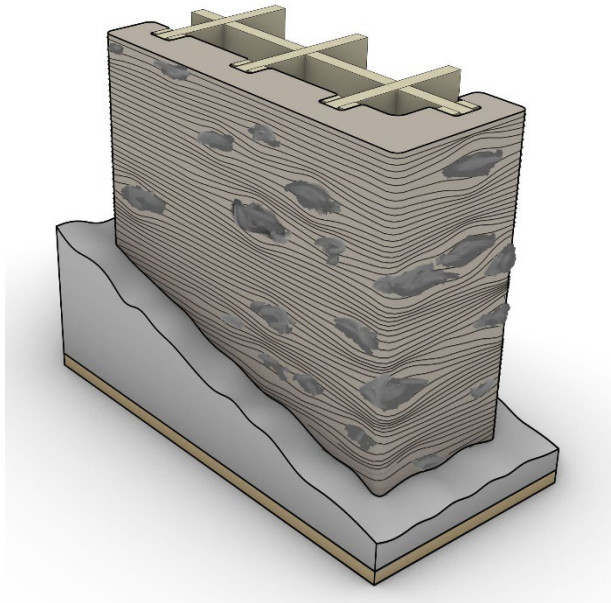
Projektets metodik har byggt på ett research-by-design-upplägg där tekniska koncept och arbetsflöden utvecklades, implementerades och testades iterativt i realistiska byggmiljöer. Arbetet organiserades i arbetspaket som omfattade materialkaraktärisering, utveckling av extruderingsutrustning för obränd lera, implementering av maskinseende och 3D-skanning, samt integrering av dessa i ett återkopplat styrsystem (figur 1).



Figur 1. Diagram som illustrerar det iterativa arbetsflödet utvecklat för projektet.

Ett centralt element i metodiken var etableringen av en digital tvilling som ska kontinuerligt uppdateras med sensordata från RGB-D-kameror och fotogrammetri. Denna tvilling fungerar som bas för adaptiv banplanering där robotens rörelser och extruderingsparametrar justeras i realtid. "Denna modell har i projektet implementerats i en iterativ version där skannad data integreras stegvis i design- och fabriktionsprocessen, med målet att möjliggöra kontinuerlig realtidsuppdatering i kommande projektfas. För kommunikation och styrning användes Robot Operating System (ROS), vilket möjliggjorde modulär utveckling och integrering av algoritmer för databehandling, kollisionskontroll och processövervakning.

För att testa och utveckla metodiken togs det fram ett scenario där processen tänks att användas för tillverkning av en grund till en byggnad (figur 2). Denna grund, konstruerad av variabelt stenmaterial och lerutskrifter, sammanbinder i detta scenario en oregelbunden och variabel markyta med en tänkt byggnad/bjälklag. Inom detta scenario planeras och utfördes delvis ett antal, progressivt mer avancerade, experiment som iterativt syftar till att förfinas och utveckla tekniken med avseende till genomförbarhet, interaktivitet och funktion.



Figur 2. Konceptuell bild av experimentscenario. Grund av natursten och extruderat lerbruk förbinder mark och byggnad.

I ett initialt skede valdes två scenarier: (1) utskrift på ojämnt underlag där skannade höjddata användes för att kompensera lagerhöjd och bibehålla geometri, och (2) inpassning av främmande objekt i utskriften genom att skanna objektets volym, subtrahera den från designmodellen och anpassa printvägarna så att objektet integrerades sömlöst.

Materialtesterna omfattade blandningar av lera och sand i olika proportioner för att optimera balans mellan extruderbarhet, stabilitet och torkningsbeteende. Fukthalt, viskositet och skikthöjd analyserades för att fastställa processparametrar som minimerade sprickbildning och deformation under torkning.

4. Utförda undersökningar

Genomförandet skedde vid Center för Byggrobotik i Lund, där en mobil robotcell placerades i en utomhusmiljö (figur 3). Cellen bestod av en ABB IRB 4600 industrirobot monterad på ett mobilt underrede, utrustad med specialutvecklad extruder för lermaterial och pump med återkopplingsstyrning (figur 4).



Figur 3. Mobil robotcell på Brunshögstorget i Lund. Figur 4: Extruder monterad på robotarm.

4.1 Förberedande utforskande

Inför de huvudsakliga experimenten genomfördes ett antal tester och experiment för att bygga upp en förståelse för utrustning, material, teknik och processer. Dessa inkluderade:

1. **Manuell utskrift** (figur 5). Genom att genomföra en förenklad version av den tilltänkta utskriftsprocessen med manuell kontroll av munstycket kunde vi bygga upp en förståelse för materialets beteende i olika situationer, och bygga en intuitiv förståelse som blev grund för kommande hypoteser om robotbanan.



Figur 5: Manuell utskrift

2. **3D-printning med lera** (figur 6). Ett antal utskrifter baserad på för-programmerade utskriftsbanor utfördes. Detta byggde upp en förståelse för vår utrustning och process.



Figur 6: 3d-printing med lera.

3. **Workshops i traditionell teknik** (figur 7). Två workshops genomfördes. Den första i samarbete med Marwa Dabaieh, professor i arkitektur och lerbyggnad vid Malmö Universitet, och Naturskolan Lund. Den hanterade mackelering, eller lerbygge, en traditionell teknik för att bygga med lera, sand och halm. Den andra workshopen organiserades av Tyréns, Lera i Norden, och Lunds Kommun, och hanterade kontemporär lerputsteknik.



Figur 7: Workshops kring traditionella lerbyggnadstekniker.

4.2 Iterativ prototyputveckling

I projektets huvudsakliga undersökning så genomfördes ett iterativt arbete med att framställa prototyper som planeras leda till en fungerande demonstrator så som i figur 2. För denna framställdes en oregelbunden grund i betong, på vilken utskrifter utfördes.

För scenario (1) – utskrift på ojämnt underlag – användes initial 3D-skanning för att generera en topografisk karta över arbetsytan (figur 10). Printvägar genererades därefter parametriskt i CAD-miljö och anpassades med hänsyn till höjdvariationer. Under utskriften justerades lagerhöjd och extruderingshastighet dynamiskt baserat på skannad data. Figur 8 visar hur dessa lager anpassas efter den inskannade ytan, och sedan progressivt kompenserar för ojämnheterna för att uppnå en plan, jämn yta. Efter att denna uppnåtts sker anpassning mot ovanliggande konstruktion (figur 9).



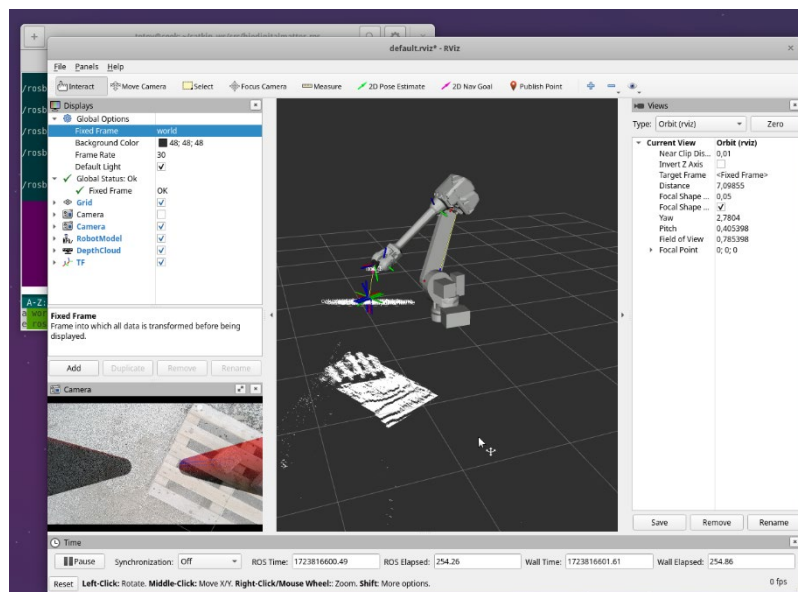
Figur 8: Utskrift på oregelbunden yta med variabel lagerhöjd för att uppnå jämna lager.



Figur 9: Anpassning till ovanliggande konstruktion när jämnt lager uppnåtts.

För scenario (2) – inpassning av främmande objekt – placerades ett naturligt stenblock i arbetsvolymen. Blocket skannades, och dess form integrerades i den digitala tvillingen. Robotens banor justerades så att lersträngarna följde blockets konturer och skapade en stabil infogning utan att skada objektet. Detta scenario är in nuläget pågående arbete, och

Alla moment dokumenterades med stillbilder, video och loggfiler för att möjliggöra analys av precision, materialbeteende och systemets adaptivitet. Resultaten användes för att justera både hårdvara och mjukvara inför framtida iterationer.



Figur 10: Digital tvilling med simulerad robot i relation till skannad data.

Eftersom detta är den första halvan av ett större projekt, där vi räknar med att få fortsatt finansiering för ytterligare två år, är processerna ännu inte kvantifierade. Vi behöver fortsätta att utveckla dem för att få relevanta kvantitativa data.

4.3 Utmaningar och svårigheter

Vi har mött ett stort antal svårigheter och problem under projektets utförande, ofta kopplat till tekniska problem och interface mellan hårdvara och mjukvara. Projektet har presenterat en stor tvärvetenskaplig utmaning, där kunskaper och erfarenheter från både robotik, programmering och arkitektur och byggnation varit nödvändiga för att komma vidare.

Exempel på sådana utmaningar är att få till en fungerande lösning för pumpning och extrudering av lerbruk. Initialt antog vi att utrustning menad för betong skulle vara tillräcklig, men detta visade sig vara fel, och tvingade oss att införskaffa en ny pump och extruderare. Detta var främst på grund av lerans högre viskositet. Vi fann en leverantör som kunde hjälpa oss i Erratic, ett italienskt uppstarts företag som utvecklade en lösning utifrån våra behov baserat på deras pump och extruderare.

Vi har även haft många "triviala" problem, som till exempel att vi inte hade en lokal vi kunde arbeta i då processen är för smutsig för robotlabbet. Vi har därför skapat ett utomhuslaboratorium i en mobil container. Denna är placerad på ett torg i Lund, i samarbete med kommunen, och det har inneburit mycket organisatoriska och praktiska problem med

transport, el- och vattentillgång, värme, med mera. Som en led i arbetet med att lösa dessa problem långsiktigt har vi gjort en ansökan till LTH och LU om infrastrukturmedel för att skapa ett dedikerat byggrobotlabb i A-byggnaden på LTH, där vi kan skapa en fysisk hemvist för den typ av experiment och arbete som kommer med byggrobotik.

Vi har även haft svårigheter med att kalibrera datormodellen med input från kameran. Detta är menat att vara fullt automatiserat, men vi har behövt använda en manuell loop där vi scannar med fotogrammetri för hand. Vi har kommit långt på vägen att automatisera detta, och räknar med att ha en automatisk och kontinuerlig datainsamling snart.

5. Doktorandens progression och resultat i relation till licentiatnivå

Projektet utgör den första etappen av ett doktorandarbete och har nu nått en nivå motsvarande en licentiatavhandling. Arbetet har sammanställts i en kappa tillsammans med ett vetenskapligt manuskript, och har presenterats vid ett mellanseminarium med extern opponert.

Under projektets första etapp har doktoranden utvecklat och implementerat en sammanhängande metodik för interaktiv, sensorbaserad robotiserad 3D-printning i byggsammanhang. Detta inkluderar integration av materialkarakterisering, maskinseende, digitala tvillingar och adaptiv styrning i ett fungerande arbetsflöde.

Arbetet har resulterat i:

- En operativ teknikplattform för robotiserad extrudering av lerbaserade material i utomhusmiljö
- Metoder för att hantera oregelbundna underlag genom adaptiv lagerhöjd och banplanering
- Integration av skannade data i design- och fabriktionsprocessen
- Initial utveckling av processer för inpassning av främmande objekt (t.ex. natursten)

Sammantaget utgör detta en sammanhållen forskningsinsats som demonstrerar genomförbarheten av interaktiv, sensoråterkopplad byggrobotik med icke-standardiserade material, och etablerar en tydlig grund för fortsatt arbete mot doktorsexamen.

6. Resultat, slutsatser och fortsatt arbete

Trots omfattande tekniska och praktiska utmaningar har projektet etablerat en fungerande och reproducerbar metodik för interaktiv, sensorbaserad 3D-printning i byggsammanhang. De genomförda experimenten visar att tekniken är genomförbar även i en komplex och variabel utomhusmiljö, samt att den kan hantera oregelbundna material och geometrier.

Projektet har därmed demonstrerat en ny typ av byggprocess där design, mätning och tillverkning integreras i en kontinuerlig återkopplingsring. Detta utgör ett viktigt steg mot mer flexibla och resurseffektiva byggmetoder baserade på lokala och återbrukade material.

Arbetet har lett till en gradvis ökning av processens autonomi. I de första testerna krävdes omfattande manuell hantering och korrigeringar, medan senare tester kunde genomföras med mer konsekvent materialflöde och färre avbrott. Automatiseringen av sensordataflödet är på god väg och förväntas ge ytterligare effektiviseringar.

De processer som utvecklats har redan kommit till bredare nytta, främst genom arbeten på magister- och masternivå för studenter inom arkitekt- och civilingenjörsprogrammen. Vi lägger också grunden för att framtida doktorander ska få möjlighet att engagera sig med digitala processer och robotar på ett lättillgängligt sätt.

Resultaten är relevanta för byggbranschen genom att de visar hur digital tillverkning kan anpassas till verkliga byggförhållanden, där material, underlag och omgivning varierar. Särskilt viktigt är möjligheten att använda lokala och återbrukade material i kombination med automatiserad produktion, vilket kan bidra till minskad klimatpåverkan och ökad flexibilitet i byggprocessen.

De processer som utvecklats och etablerats har lagt en robust grund för projektets andra fas. Under denna period kommer fokus att ligga på:

1. Iterativt tillverka en serie alltmer avancerade prototyper som utforskar frågeställningen, baserat på den process som utvecklats.
2. Färdigställa och integrera en fungerande maskinseende i realtid, med kontinuerlig uppdatering av digital tvilling.
3. Förkorta den iterativa loopen i projektet mellan maskinseende, designbeslut på algoritmnivå och fabrikation.
4. Kvantifiera och analysera de performativa resultaten.
5. Framställa en storskalig "demonstrator" som kan ställas ut.
6. Publicera och kommunicera projektet och dess resultat.
7. Dokumentera och kvalitetssäkra verktyg, processer och metoder som utvecklats.
8. Avsluta och försvara avhandling.

Litteraturförteckning

1. Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Kannenberg, F., Mindermann, P., Balangé, L., Guo, Y., Hügler, S., Gienger, A., Forster, D., Bischoff, M., Tarin, C., Middendorf, P., Schwieger, V., Gresser, G.T., Menges, A., Knippers, J.: Computational co-design framework for coreless wound fibre–polymer composite structures. *J Comput Des Eng.* 9, 310–329 (2022). <https://doi.org/10.1093/JCDE/QWAB081>
2. Jipa, A. person, Aghaei Meibodi, M., Giesecke, R., Shammass, D., Leschok, M., Bernhard, M., Dillenburger, B.: 3D-Printed Formwork for Prefabricated Concrete Slabs. In: 1st International Conference on 3D Construction Printing (3DcP) (2018)
3. Dörfler, K., Hack, N., Sandy, T., Gifftthaler, M., Lussi, Manuel, Walzer, A.N., Buchli, J., Gramazio, F., Kohler, M.: Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: case study Mesh Mould wall of the DFAB HOUSE. *Construction Robotics 2019* 3:1. 3, 53–67 (2019). <https://doi.org/10.1007/S41693-019-00020-W>
4. Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Wang, L., Ding, T., Duan, Z., Du, S.: Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cem Concr Compos.* 122, 104115 (2021).
5. Heidarneshad, F., Zhang, Q.: Shotcrete based 3D concrete printing: State of art, challenges, and opportunities. *Constr Build Mater.* 323, 126545 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126545>
6. Lachmayer, L., Böhler, D., Freund, N., Mai, I., Lowke, D., Ratz, A.: Modelling the influence of material and process parameters on Shotcrete 3D Printed strands - cross-section adjustment for automatic robotic manufacturing. *Autom Constr.* 145, 104626 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104626>
7. Chadha, K, Vasey, L, Kango, A, Aejmelaeus-Lindström, P, Gramazio, F, Kohler, M, Assunção, J, Brumaud, C, Habert, G, Malczyk, G, Hutter, M. Impact printed structures : design systems and construction strategies. *Fabricate* 2024. 5, 188–195 (2024). <https://doi.org/10.2307/JJ.11374766.28>
8. Jenny, D., Gramazio, F., Kohler, M.: Reimagining Earthen Materials: The New Era of Sustainable and Digital Construction. *Architectural Design.* 94, 56–63 (2024). <https://doi.org/10.1002/AD.3097>
9. Breseghello, L., Talaei, A., Florenzano, D., Naboni, R.: Shape-Env: Camera-enhanced robotic terrain-shaping for complex 3D concrete printing. *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe.* 1, 539–548 (2023). <https://doi.org/10.52842/CONF.ECAADE.2023.1.539>
10. Çapunaman, Ö.B., Iseman, E.K., Gürsoy, B.: Material-in-the-Loop Fabrication: A Vision-Based Adaptive Clay 3D Printing Workflow on Indeterminate Sand Surfaces. *Communications in Computer and Information Science.* 1819 CCIS, 410–424 (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-37189-9_27/FIGURES/8