

# Analys med manikin för bättre geometrisk kvalitet vid manuell montering (AMIGO)

Publik rapport



Författare: Mikael Rosenqvist  
Datum: 2023-01-30  
Projekt inom Hållbar produktion

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>4</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>5</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod .....</b>	<b>8</b>
<b>5 Mål .....</b>	<b>9</b>
5.1 Övergripande mål.....	9
5.2 I respektive arbetspaket är målen.....	9
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>9</b>
6.1 Resultat .....	10
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>15</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	16
7.2 Publikationer.....	16
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>16</b>
8.1 Slutsatser .....	16
8.2 Fortsatt forskning .....	17
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>17</b>
<b>10 Referenser.....</b>	<b>18</b>

## Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

Målet med projektet är att med hjälp av en manikin analytiskt bestämma komplexitetsnivån för manuella monteringsoperationer för att uppnå bättre geometrisk kvalitet. Projektet har tagit traditionellt mjuka värden och omvandlat dessa till mätbara parametrar som går att proaktivt införliva i nya produkter och system.

Nyheten är att koppla ihop två separata forskningsspår till ett. I det ena spåret har grunderna för kopplingen mellan monteringsergonomi och geometrisk kvalitet studerats och bevisats samt att bedömningskriterier för monteringsergonomisk komplexitet har tagits fram och implementerats i ett CAT-verktyg. I det andra spåret har en biomekanisk modell av människan utvecklats för att virtuellt kunna modellera, simulera och optimera en operatörs rörelser vid montering.

Syftet med att koppla ihop dessa två forskningsspår är att ta fram en helhetslösning som möjliggör att analytiskt kunna simulera och proaktivt prediktera en systemlösning med avseende på både produktens kvalitet och montörens förutsättningar och arbetsmiljö. Projektet bygger på fallstudier och utgår från verkliga kvalitetsproblem hos de medverkande fordonstillverkarna Volvo Cars, CEVT, NEVS och Scania CV AB.

Forskningsresultaten har skapat nya och förbättrade verktyg och arbetssätt för geometriseringsingenjörer och produktionsberedare som redan i tidig utvecklingsfas nu kan prediktera monteringsrelaterade kvalitetsrisker analytiskt och problem förknippade med dessa. Att flytta en del av fokuset på monteringslösningar och processupplägg från beredningsfasen till konceptfasen gör det möjligt att korta tiden för utveckling av nya produkter.

Två demonstratorer har tagits fram i projektet:

- Verktyg för att virtuellt bedöma komplexitetsnivån för en manuell montering. Verktyget bygger på att man tar existerande information i en CAT-modell i RD&T och skickar den till IPS där en monteringsmodellering automatiskt sker mha en manikin och simuleringens resultat skickas tillbaka till RD&T som input till den tänkta geometriseringslösningen.
- Verktyg för att virtuellt simulera effekterna av tjuvstyrning vid manuell montering. I RD&T kan man peka ut vilka referenser som kan tänkas tjuvstyra och sen räknas automatiskt alla tänkbara varianter av refsystem ut och hur mycket spridning som dessa kan ge.

Flera delresultat har nått så hög mognadsgrad att de redan industrialiserats och finns tillgängliga kommersiellt i IPS.

Projektets resultat är angeläget eftersom det möjliggör ytterligare ett steg i att digitalisera industrin och på så sätt uppnå en hållbar produktion. Tidigare forskning om hållbarhet har mestadels begränsats till miljömässiga och ekonomiska aspekter. Under senare år har dock den sociala dimensionen fått ett ökat erkännande som en grundläggande faktor i begreppet hållbar utveckling. I detta forskningsprojekt beaktas alla tre dimensioner samtidigt och den sociala dimensionen ingår som en förutsättning och möjliggörare för att uppnå såväl ekonomiska som kvalitetsmässiga mål. I projektresultatet finns potential till avsevärt minskat slöseri av såväl mänskliga som miljömässiga och ekonomiska resurser och förväntas därmed stärka konkurrenskraften inom industrin.

Chalmers och Wingquist Laboratory har varit huvudsökande och projektledare för projektet, Fraunhofer-Chalmers Centre medsökande och i projektet bidrog Volvo Cars, CEVT, Scania CV AB, NEVS och Plasman. Även mjukvaruföretagen RD&T Technology och IPS AB har lagt tid i projektet. RISE deltog i projektet som rådgivare och bidrog genom sitt nätverk i svensk industri till en heltäckande resultatåterkoppling och resultatspridning.

## 2 Executive summary in English

The development of the Swedish automotive industry and its subcontractors is facing previously unprecedented challenges such as product complexity, sustainability requirements and ever faster innovation cycles. Companies' ability to adapt is more important than ever and digitization offers new opportunities. An important factor for digitization is virtual models of processes, products or services. By pairing the virtual and physical worlds, analytics and active decision-making are allowed to take care of problems before they even arise.

To gain confidence in virtual tolerance analysis tools, it is very important that the simulation results are accurate and that they capture all the factors that affect the product. Although many assembly steps in production can be automated, most of the steps in final assembly in the automotive industry are performed by humans and there is no indication that this will change. Because humans are different from robots, other factors must be considered when designing products to be assembled manually (Rosenqvist et al, 2017).

Tolerance analysis and variation simulation for manual assembly is a relatively immature area. Knowledge that an operator adds variation, often called process tolerance, is good. But knowledge of how to simulate this and be able to predict this proactively is low. At the same time, the trends are towards more and more manual assembly in order to have a flexible production (Hong, Y. & Chang, T.C., 2002, Coletti, P. and Aichner, T., 2011,).

Previous research on sustainability has mostly been limited to environmental and economic aspects. In recent years, however, the social dimension has gained increased recognition as a fundamental factor in the concept of sustainable development. In this research project, all three dimensions are taken into account at the same time and the social dimension is included as a prerequisite and enabler for achieving both financial and quality goals. In the project layout, there is potential for significantly reduced waste of human as well as environmental and financial resources and is thus expected to strengthen competitiveness within the industry. There are huge profits to be made by creating sustainable assembly solutions through the reduction of possible assembly-related errors and the scrapping of discarded material. Thereby, productivity and overall profitability can increase significantly (Falck et al, 2017).

The goal of the project is to analytically determine, using a manikin, the level of complexity of manual assembly operations to achieve better geometric quality. The project has taken traditionally soft values and converted these into measurable parameters that can be proactively incorporated into new products and systems.

The novelty is to connect two separate research tracks into one. In one track, the basics of the link between assembly ergonomics and geometric quality have been studied and proven, and assessment criteria for manual assembly complexity have been developed and implemented in a CAT tool. In the second track, a biomechanical model of the human has been developed to virtually model, simulate and optimize an operator's movements during assembly.

The research results have created new and improved tools and working methods for geometry assurance engineers and production planners who, already in the early development phase, can now analytically predict assembly-related quality risks and problems associated with them. Moving part of the focus on assembly solutions and process layouts from the preparation phase to the concept phase makes it possible to shorten the time for development of new products.

Two demonstrators have been produced in the project:

- Tools to virtually assess the level of complexity of a manual assembly. The tool is based on taking existing information in a CAT model in RD&T and sending it to IPS where an assembly

simulation is automatically performed using a manikin and the simulation result is sent back to RD&T as input to the intended geometry system solution.

- Tool to virtually simulate the effects of mis-constraining during manual assembly. In RD&T, you can point out which locators can be mis-constrained and then automatically calculate all conceivable variants of locating systems and how much variation these can give.

Several sub-results have reached such a high degree of maturity that they have already been industrialized and are available commercially in IPS.

The project's results are urgent because it enables another step in digitizing the industry and thus achieving sustainable production. Previous research on sustainability has mostly been limited to environmental and economic aspects. In recent years, however, the social dimension has gained increased recognition as a fundamental factor in the concept of sustainable development. In this research project, all three dimensions are taken into account at the same time and the social dimension is included as a prerequisite and enabler for achieving both financial and quality goals. In the project result, there is potential for significantly reduced waste of human as well as environmental and financial resources and is thus expected to strengthen competitiveness within the industry.

Chalmers and Wingquist Laboratory have been the main applicant and project manager for the project, the Fraunhofer-Chalmers Center co-applicant and Volvo Cars, CEVT, Scania CV AB, NEVS and Plasman contributed to the project. The software companies RD&T Technology and IPS AB have also invested time in the project. RISE participated in the project as an advisor and contributed through its network in Swedish industry to a comprehensive result feedback and dissemination of results.

### 3 Bakgrund

Utvecklingen för svensk fordonsindustri och dess underleverantörer står inför tidigare oöverträffade utmaningar som produktkomplexitet, hållbarhetskrav och allt snabbare innovationscykler. Företagens anpassningsförmåga är viktigare än någonsin och digitalisering ger nya möjligheter. En viktig faktor för digitalisering är virtuella modeller av processer, produkter eller tjänster. Genom att para ihop de virtuella och fysiska världarna tillåts analyser och ett aktivt beslutsfattande för att ta hand om problem innan de ens uppstår.

I den strategiska färdplanen "Factories of the Future 2020" (EFFRA, 2013), lyfts modellering, simulering och prognostiserande metoder och verktyg fram som exempel på lösningar för att exempelvis kunna kombinera hög prestation och kvalitet med kostnadseffektiv produktivitet samtidigt som resursförbrukning och -slöseri minskas.

Företagens produktportföljer diversifieras allt mer. Globala tillverkare med flera fabriker står därför inför ökade utmaningar om att bibehålla hög kvalitet och hålla sina produktionsprocesser effektiva och robusta. Hög monterings effektivitet är en viktig faktor att säkerställa för även om automatiseringsgraden ökar är människan fortfarande en viktig del av produktionen i fordonsindustrin. 80 % av alla uppgifter i slutmonteringen utförs av människor (Fasth, 2012). Människan är fortfarande överlägsen maskinen då det gäller flexibilitet.

Geometrisk variation påverkar alla massproducerade produkter. Denna variation kommer att leda till avvikelser från produktens utformning på ritning, både vad gäller estetiska och funktionella egenskaper. Geometrisk variation härstammar antingen från tillverkningen av de ingående komponenterna eller från monteringsprocessen.

Morse et al. (2018) ger en god sammanfattning av området. Ett sätt att prediktera effekterna av geometrisk variation är att göra en variationssimulering. Denna typ av simuleringar, baserade på Monte Carlo (MC) –simuleringar används som idag som bas för toleransanalys i stora delar av fordonsindustrin och delar av flyg- och rymdindustrin. Simuleringsmetoden nyttjar information om

ingående komponenters statistiska variation, mekaniska egenskaper, hur de är lokaliserade mot varandra, ev. fixturer samt typ av sammanfogning för att prediktera hur variation i ingående komponenter resulterar i variation i slutprodukten. Med hjälp av denna information kan den statistiska fördelningen av kritiska åtgärder på monteringsnivå förutses. Forskargruppen Geometry Assurance & Robust Design på Chalmers är ledande inom området, i synnerhet gällande icke-stel variationssimulering där MC-simuleringar kombineras med finita elementmetoden (FEM). Forskargruppen utvecklar simuleringsprogramvaran RD&T som används av ett stort antal företag. Bland övriga framstående aktörer kan nämnas University of Warwick (Prof. Ceglarek), St.Petersburg Polytechnic University (Prof. Lupuleac) och Ecole normale supérieure de Cachan (Prof Anwer, Prof. Mathieu).

För att få förtroende för virtuella verktyg för toleransanalys är det mycket viktigt att simuleringsresultaten är korrekta och att de fångar alla faktorer som påverkar produkten. Trots att många monteringssteg i produktionen kan automatiseras, utförs de flesta momenten i slutmonteringen i bilindustrin av människor och inget tyder på att detta kommer att förändras. Eftersom människor skiljer sig från robotar måste andra faktorer beaktas vid utformning av produkter som ska monteras manuellt (Rosenqvist et al, 2017).

Toleransanalys och variationssimulering för manuell montering är ett relativt omoget område. Vetskapen om att en operatör adderar variation, ofta kallad processtolerans, är god. Men kunskap om hur man simulerar detta och kan prediktera detta proaktivt är låg. Samtidigt går trenderna mot mer och mer manuell montering för att få en flexibel produktion (Hong, Y. & Chang, T.C., 2002, Coletti, P. and Aichner, T., 2011.).

Tidigare forskning om hållbarhet har mestadels begränsats till miljömässiga och ekonomiska aspekter. Under de senaste åren har dock den sociala dimensionen fått ett ökat erkännande som en grundläggande faktor i begreppet hållbar utveckling. I detta forskningsprojekt beaktas alla tre dimensioner samtidigt och den sociala dimensionen ingår som en förutsättning och möjliggörare för att uppnå såväl ekonomiska som kvalitetsmässiga mål. I projektupplägget finns potential till avsevärt minskat slöseri av såväl mänskliga som miljömässiga och ekonomiska resurser och förväntas därmed stärka konkurrenskraften inom industrin.

Det finns stora vinster att skapa genom att skapa hållbara monteringslösningar genom minskning av eventuella monteringsrelaterade fel och skrotning av kasserat material. Därigenom kan produktiviteten och den totala lönsamheten öka betydligt (Falck et al, 2017).

Projektgruppen har tidigare genomfört ett flertal VINNOVA-finansierade studier som ligger till grund för just det här fortsatta projektet.

År 2009 startade ett samarbete mellan Chalmers, Swerea IVF (numera RISE) och svensk fordonsindustri kring hur manuell montering påverkar den geometriska kvaliteten. Detta industriella problemområde hade tidigare inte utforskats. I två på varandra följande projekt undersöktes kopplingen mellan monteringsergonomi och geometrisk kvalitet och verktyg utvecklades för att kunna ta hänsyn till kopplingen i de virtuella modellerna.

I projektet "Beslutsstöd för tidig estimering av kvalitetsbristkostnader" (i fortsättningen kallat COPQ) undersöktes först och främst om kopplingen mellan monteringsergonomi och geometrisk kvalitet verkligen existerar. Det visades att dåliga ergonomiska förutsättningar leder till 6-8 gånger fler monteringsrelaterade fel jämfört med goda förutsättningar och att av dessa var 86 % geometrirelaterade (Falck et al., 2012b). Hela 93 % av samtliga fel inträffade vid hög och medelhög fysisk belastningsnivå. Studien visade också att en hög grad av monteringskomplexitet ger betydligt fler fel. Reaktiva lösningar för att justera kvaliteten är därför vanliga och utförs i så mycket som 90 % av fallen (Rosenqvist et al, 2013). Kvalitetsbrister är mer tidskrävande och dyrare att reparera ju senare de upptäcks: upp till 10 gånger i fabrik och ytterligare 12 gånger på marknaden jämfört med direkt upptäckning (Falck och Rosenqvist 2012a).

I det följande projektet: "Proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion" (i fortsättningen kallat Pegasus) togs flera verktyg fram. Bland annat utvecklades en verifierad kalkylmodell för prediktiv bedömning av monteringsergonomiska

förutsättningar med koppling till kvalitet. Dessutom tog projektet fram en uppdaterad geometrisäkringsprocess för att redan under tidig produktutvecklingsfas kunna identifiera potentiella kvalitets- och ergonomirisker.

I Pegasus visade det sig att trots att produktutvecklingen simulerat de geometriska slutkrav som fanns på produkten som gröna (inom specifikation) så blev två tredjedelar av dem röda (utanför specifikation) i produktionen, vilket ledde till omfattande kvalitetsbristkostnader och åtgärder. I Pegasus har vi visat att ett skäl till detta är att endast cirka en tiondel av den virtuella geometrisäkringen innehåller någon form av processtoleranser, d.v.s. mängden variation eller geometriska fel som en operatör (på grund av sin mänsklighet) bidrar till i monteringen. I stället antas det att operatören alltid genomför ett felfritt och perfekt monteringsjobb.

Huvudanledningarna till detta är att 1) det saknas enkla sätt att ta hänsyn till operatörspåverkan i de verktyg som används idag och 2) det finns en allmän okunskap om hur grundläggande förutsättningar påverkar kvalitetsutfallet vid manuell montering.

Kvarstående från detta projekt är att det saknas en numerisk metod att göra bedömningen i tidiga faser med hjälp av simuleringsmodeller. De nuvarande metoderna baseras på subjektiv bedömning av flertalet personer vilket leder till ett osäkert beslutsunderlag. Denna brist har adresserats i detta projektet.

År 2009 startade också ett annat samarbete, detta mellan FCC, Chalmers, Högskolan i Skövde och svensk fordonsindustri, för att utveckla ett digitalt verktyg för att automatiskt beräkna och visualisera en möjlig monteringsrörelse som minimerar den muskuloskeletala hälsoeffekten för en population av operatörer. Utvecklingen har drivits inom ramen för flertalet projekt såväl implementeringsprojekt som forskningsprojekt, exempelvis CROMM – Creation of Muscle Manikins och Virtual Verification of Human Robot Collaboration.

Inom ramen för dessa projekt har en biomekanisk modell av människan utvecklats och implementerats. Målet har varit att möjliggöra en enkel och effektiv analys av manuell montering för att i tidigt skede innan produktionsstart kunna upptäcka och förhindra oönskad ergonomisk belastning. De framgångsrika rörelseberäkningsmetoderna är baserade på en matematisk formulering av mänsklig komfort där man försöker undvika bl.a. extrema ledvinklar, höga vridmoment och obalans.

Digital Human Modeling (DHM) är ett etablerat forskningsområde och det finns ett antal framstående forskargrupper i världen som arbetar inom området. Exempel på utmärkta grupper och verktyg är: AnyBody (Rasmussen et al., 2002), EMA (Fritzsche et al., 2011), Jack (Badler, 1993), Ramsis (Siedl, 1997) och Santos (Yang et al., 2005). Några av dessa är implementerade i stora kommersiella CAD-verktyg som säljs av företag som Siemens och Dassault, eller säljs som fristående produkter av mindre och forskningsnära spin-offs. I maj 2017 blev IPS IMMA (utvecklad av FCC) tillgänglig på marknaden för att öka kvalitén och effektiviteten i bedömning av fysisk ergonomi vid montering (Högberg et al., 2016). IPS IMMA erbjuder unik funktionalitet för att: (i) skapa och hantera familjer av maniker som representerar mänsklig mångfald (Brolin et al., 2017), (ii) automatiskt hitta kollisionsfria rörelsebanor, med hänsyn tagen till delkomponenten, människan och omgivande miljö, med minimal biomekanisk belastning på arbetaren (Bohlin et al., 2012), (iii) instruera maniken genom användning av ett högnivå instruktionsspråk inspirerat av förutbestämda rörelsestidssystem såsom MTM (Maynard et al., 1948), MOST (Zandin, 1990) och SAM (Wiklund, 1990) (Mårdberg et al., 2014), och (iv) ergonomiutvärdering av simuleringsresultaten baserat på metoder som använder kinematiska data (Rhén et al., 2018). På lägre TRL-nivåer innehåller demonstrationsversioner av IPS IMMA också unik funktionalitet för att modellera muskler och utföra simuleringar där den mänskliga modellen och omgivningen, t.ex. bära föremål, behandlas som ett helt dynamiskt system. Dessutom har ett arbete för att kombinera motion capture med VR-teknologi startats.

En stor utmaning projektet tagit sig an är att ytterligare förenkla och automatisera och kvalitetssäkra användandet av simuleringsverktygen, RD&T och IPS, så att de kan kopplas ihop med geometriseringsprocessen. Utöver dessa finns det flera andra stora kommersiella programvaror för toleransanalys, men ingen av dessa erbjuder den typen av simulering som projektet ämnar utveckla. I Sverige är det RD&T och IPS som har den största spridningen i industrin därav så kan så många svenska företag som möjligt tillgodogöra sig resultatet genom att basera demonstratorerna på dessa.

## 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektets syfte är att ta traditionellt mjuka värden och omvandla dessa till mätbara parametrar som går att proaktivt införliva i nya produkter och system.

Tidigare forskningsprojekt har kunnat visa på hur kvaliteten, kostnaderna och arbetsmiljön påverkas av komplexitetsnivån hos en manuell montering. Vidare har kriterier för att bedöma komplexitetsnivån hittats och verifierats. Det är ännu unikt idag att göra denna koppling mellan manuell monteringskomplexitet och geometrisk kvalitet. Parallellt med dessa forskningsprojekt har flera andra bedrivits där en manikin har forskats fram och verifierats som kan simulera en människa vid manuella monteringar.

Nyheten i projektet är att koppla ihop dessa två forskningsspår för att ta fram en helhetslösning som möjliggör en analytisk totallösning för att kunna simulera och proaktivt prediktera en systemlösning med avseende på både produktens kvalitet och montörens förutsättningar och arbetsmiljö.

I detta projekt har vi byggt vidare på dessa tidigare forskningsprojekt. Dels genom att koppla ihop dem för att kunna göra fullständiga simuleringar av en systemlösning, dels genom att bygga på respektive verktyg/metod med ny och förbättrad kunskap. Projektet har tagit fram industriellt utvärderade demonstratorer.

Metoderna och verktygen kommer att utgå från monteringsergonomiska konsekvenser, geometrisk kvalitet och potentiella kvalitetsbristkostnader.

Projektet bygger på fallstudier och utgår från verkliga kvalitetsproblem hos de medverkande fordonstillverkarna Volvo Cars, CEVT, NEVS och Scania CV AB. Forskningen har baserats dels på tidigare resultat från projekten ovan, dels på data från ett antal nya produktkoncept. Syftet är att få ett tillräckligt urval för att kunna generalisera resultaten. Två examensarbeten har genomförts.

Projektet är uppdelat i tre arbetspaket:

AP1: Analytisk bedömning av komplexitetsfaktorer

I tidigare forskning identifierades 16 st högkomplexitetskriterier som avgör komplexitetsnivån för en manuell montering. En enkel bedömningsmall för dessa togs också fram. Denna bygger dock på erfarenhet och praktiska test. I detta delprojekt har forskning genomförts kring hur en del av dessa kriterier kan bedömas analytiskt med hjälp av resultat från IMMA-projekten.

För att automatisera och snabba upp användningen av IMMA har följande metoder och algoritmer utvecklats:

- (i) Automatisk banplanering som inte kräver en start och slut position från användaren, istället ska de automatiskt skapas från information som geometriseringsprocessen ger (RD&T).
- (ii) Förenklad och automatisk greppdefiniering vid komplex montering.
- (iii) Hantering av fri sikt, där manikinen automatiskt ändrar ställning för att om möjligt hålla fri sikt.
- (iv) Hitta ergonomiska utvärderingar som kan användas för att ge ett klart ja/nej svar vilket komplexitetsmetoden kräver.

AP2: Simulering av geometrisk kvalitet vid tjuvstyrning



I detta delprojekt har tillämpad forskning genomförts kring vad som händer när en manuell monteringsoperation inte lyckas till fullo. Produkten blir monterad men inte på det sätt som systemlösningen avser. Det scenario som har fokuserats på är när komponentens alla sex frihetsgrader (tre för translation och tre för rotation) blir låsta genom operatörens montering på ett annat sätt än det som var tänkt, så kallad tjuvstyrning.

Datainsamling har skett hos de medverkande företagen för att möjliggöra fördjupade analyser av fenomenet, delvis via ett exjobb. Exjobbet analyserade effekterna av tjuvstyrning. Avsikten är att undersöka hur den ”nya” systemlösningen, som uppstått på grund av en tjuvstyrning, påverkar monteringskvaliteten och hur detta fenomen skall kunna simuleras.

AP3: Verktyg för monteringsergonomiskt geometrisäkrade lösningar med låg komplexitet

I AP3 har resultaten från AP1 och AP2 vävts samman och blivit bas i framtagningen av validerade verktyg i demonstratorform. Dessa verktyg syftar till att stödja proaktiva systemlösningsbeslut i tidig projektutvecklingsfas, med avseende på geometrisk kvalitet, monteringsergonomi, monteringskomplexitet och kvalitetsbristkostnader.

Denna metod implementeras i RD&T och IPS i form av två demonstratorer. Industriellt test genomförs på partnerföretagen.

## 5 Mål

### 5.1 Övergripande mål

Forskningsresultaten förväntas skapa nya och förbättrade verktyg och arbetssätt för geometrisäkringsingenjörer och produktionsberedare som redan i tidig utvecklingsfas kommer att kunna prediktera monterings-relaterade kvalitetsrisker analytiskt och kostnader förknippade med dessa. Att flytta en del av fokusen på monteringslösningar och processupplägg från beredningsfasen till konceptfasen gör det tänkbart att korta tiden för utveckling av nya produkter

### 5.2 I respektive arbetspaket är målen

AP1: Målet är att möjliggöra en konsekvent och effektiv komplexitetsbedömning med hög kapabilitet som kan ske tidigt utan behov av varken fysiska produkter, utrustningar eller tester. Industriella försök kommer att göras för att verifiera simuleringsresultat.

AP2: Målet är att utveckla en verifierad metod och ett verktyg för prediktiv bedömning av hur den geometriska kvaliteten påverkas av tjuvstyrning, något som skulle bli en värdefull kvalitetsäkringsmetod i industrin och som inte existerar idag.

AP3: Målet är att ha industriellt validerade demonstratorer vid projektslut.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

Målet är att med hjälp av en manikin analytisk bestämma komplexitetsnivån för manuella monteringsoperationer för att uppnå bättre geometrisk kvalitet vid manuell montering. Målet är uppnått och delvis överträffat med de metoder och verktyg som är resultatet av projektet.

Nya algoritmer och simuleringsmetoder för att simulera förväntad geometrisk kvalitet vid s.k. tjuvstyrning (att artikeln blir monterad men inte så som konstruktionen och processen avsåg) har utvecklats som identifierades som en viktig faktor vid tidigare studier. Idag existerar inga sådana kommersiella möjligheter och funktionen kommer därför att bli en unik konkurrensfördel för den svenska fordonsindustrin.

Projektresultaten har stärkt, inte bara projektets avnämare industrin, utan även konkurrenskraften hos de två forskargrupperna. Resultaten har ökat den internationella synligheten i form av publikationer och citeringar, breddat det akademiska kontaktnätet och ökat den industriella samarbetsbasen. Projektet utgör ett lysande exempel på hur djup akademisk kompetens inom ergonomi, montering, matematik och statistisk toleransanalys kan kombineras i ett simuleringsverktyg som på ett konkret sätt har möjlighet att stärka svensk industris konkurrenskraft och samtidigt bidra till social hållbarhet.

## 6.1 Resultat

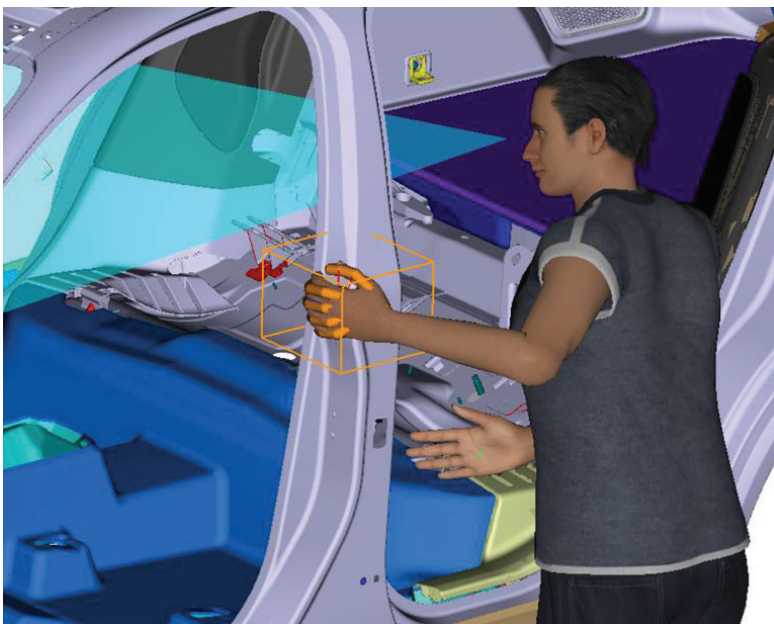
AP1:

- Fri sikt
  - Målet var att automatiskt hantera fri sikt, där manikinen automatiskt ändrar ställning för att om möjligt hålla fri sikt.
  - Resultat: Inkludera fri sikt som ett kriterium i inverskinematiken:
  - Vi utökar komfortfunktionen med

$$h_v(\theta) = \begin{cases} -\frac{n}{2} \sum_i \left( \frac{1}{d_i(\theta)} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d(\theta) \leq d_0 \\ 0, & d(\theta) > 0 \end{cases}$$

– Där d är distansen mellan synlinjen och andra objekt

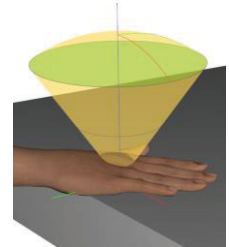
Med detta kan fri sikt inkluderas in simuleringen och målet är uppfyllt.



- Semiautomatisk greppdefinition
  - Målet Förenklad och automatisk greppdefiniering vid komplex montering
  - Resultat:
  - Kontaktmodell: Punktkontakt med friktion. Krafterna kan inte glida, och definieras med hjälp av friktionskon

$$\mathcal{F} = \{ \mathbf{f} \mid \| \mathbf{f}_{\text{tangent}} \| \leq \mu \| \mathbf{f}_{\perp} \|, \quad f_z \geq 0 \}$$

där  $\mu$  är den statiska friktionskoefficienten förknippad med ytan.  
 $\mathbf{f} = \mathbf{f}_{\perp} + \mathbf{f}_{\text{tangent}}$  är den totala kraftpåverkan vid en kontaktpunkt.



Vi använder "wrench hull" för att beräkna kvalitet på grepp.  
 Delrymd av "wrench space".

$$\tilde{\mathcal{W}} = \{ \mathbf{w} \mid \mathbf{w} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} \mathbf{w}_{i,j}, \quad \mathbf{w}_{i,j} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{i,j} \\ \lambda(\mathbf{d}_i \times \mathbf{f}_{i,j}) \end{bmatrix}, \quad \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} = 1, \quad \alpha_{i,j} \geq 0 \}$$

Vi kan nu mäta greppkvalitet med hjälp av två mått, Epsilon och Volym.

Epsilon är radien på den största 6D sfären som kan skapas i wrench hull. Ett grepp är i force closure om radien  $> 0$ .

Epsilon är ett worst-case mått och representerar storleken på den minsta wrench vector som kan pressa greppet till gränsen.

Volymmåttet är volymen av wrench hull och är ett genomsnittsmått.

Med detta kan grepp skapas automatiskt och målet är uppfyllt.

- Gränssnitt mellan RD&T och IPS
- Målet Automatisk banplanering som inte kräver en start och slut position från användaren, istället ska de automatiskt skapas från information som geometrisäkringsprocessen ger (RD&T) samt att kunna hitta utvärderingskriterier för att skicka tillbaka till RD&T.
- Resultat: Mha ipc skickas kommandon från RD&T till IPS och automatiskt sker uppbyggnad av simuleringsmodell, en simulering och analys av 9 komplexitetskriterier som sedan automatiskt returneras till RD&T.
  - Starta IPS
    - IPS startas inifrån RD&T.
  - Resten av punkterna nedan sker sedan automatiskt:
    - Ladda .ips-fil
      - En scen laddas från fil för att sätta upp monteringsstation etc. i IPS.
    - Ladda planeringsgeometri
      - En geometrifil innehållandes geometrin till detaljen som ska monteras laddas in.
    - Ladda hindergeometrier

- En eller flera filer innehållandes "hindergeometrier" laddas in. Dessa är geometrier som planeringsgeometrin inte får kollidera med under banplaneringen.
- Banplanera
  - En bana planeras för planeringsgeometrin från en startpunkt till dess monterade position.
  - Banan tar hänsyn till den slutgiltiga monteringsriktningen.
  - En lista med viapunkter kan också anges för att definiera mellanliggande positioner som banan måste gå igenom.
- Optimera grepp
  - Grepppunkter för vänster och/eller höger hand genereras automatiskt och anpassas för att manikinen ska kunna greppa planeringsgeometrin.
  - Användaren kan antingen acceptera dessa autogenererade grepppunkter eller välja att modifiera dem manuellt innan de returneras till RD&T.
- Efterfråga ergonomievalueringsmetoder
  - IPS returnerar en lista med tillgängliga ergonomievalueringsmetoder som kan användas för ergonomiutvärdering när ergonomikomplexitetskriteriet beräknas.
- Utvärdera komplexitetskriterier
  - En godtycklig manikinfamilj kan laddas in i IPS.
  - Startpositionen för manikinerna anpassas automatiskt för att förbereda för greppning av det autogenererade greppet.
  - En punkt för manikinerna att fokusera blicken på under monteringen kan specificeras.
  - Golvhöjden kan justeras.
  - Massan på planeringsobjektet kan ställas in.
  - Manikinerna greppar planeringsgeometrin och följer den från dess startposition till dess slutposition.
  - Vilken metod att använda för ergonomikomplexitetskriteriet kan specificeras tillsammans med ett gränsvärde för vad som räknas som låg/hög komplexitet.
  - Komplexitetskriterierna beräknas och resultatet returneras till RD&T.
- Stäng IPS
  - Stänger ner IPS-applikationen.

Med denna funktion är målet uppfyllt.

#### AP2:

- Databasinsamling och kunskapsökning

Forskningsområdet kring tjuvstyrning är ganska omoget och få studier och inga simuleringsmetoder finns för att prediktera detta. Därför krävs ökning av kunskapsnivån för att kunna uppfylla målet att kunna simulera tjuvstyrning vid manuell montering.

Resultat:

I projektet har omfattande fysiska studier gjorts av manuell montering vid olika möjliga scenarier där tjuvstyrning kan förekomma. Mätning av den geometriska kvaliteten har skett vid alla monteringar som upprepats flera ggr och med olika operatörer för att kunna generalisera resultat så mycket som möjligt. Detaljerad info finns i de publikationer som listas i kapitel 7.



3 olika huvudkällor till tjuvstyrning identifierade i projektet:

- Kollision där ett annat objekt än refarna tar över styrningen
- Korrekta refar styr, men inte på det sätt systemlösningen avser pga avvikelser i komponenter
- Korrekta refar styr, men inte på det sätt som systemlösningen avser pga processpåverkan

Genom den insamlade datan och de utförda testerna finns grunden för att kunna ta fram en simuleringsmetod och därmed uppfylla målet.

- Metod för simulering av tjuvstyrning

Målet är att utveckla en verifierad metod och ett verktyg för prediktiv bedömning av hur den geometriska kvaliteten påverkas av tjuvstyrning.

Resultat:

Baserat på resultatet från föregående har en simuleringsmetod tagits fram i RD&T som adresserar de två sista källorna av tjuvstyrning:

Att refarna kommer i kontakt men att de inte styr som tänkt utan de får en annorlunda styrriktning än vad systemlösningen avsåg.

I RD&T kan man peka ut vilka refar som kan tänkas tjuvstyra och då räknar RD&T ut alla tänkbara varianter av refsystem som kan uppkomma pga detta och genomför variationssimulering för alla dem och man får ut bästa, sämsta och tänkta resultatet.

*AP3:*

- Demonstratorer

Båda demonstratorerna färdiga och initialt testade med gott resultat, mer testning och finslipning krävs för kommersialisering och anpassning till aktuella regelverk och gränsvärde hos aktuella företag. Därmed är målet för AP3 uppfyllt och projektet som helhet.

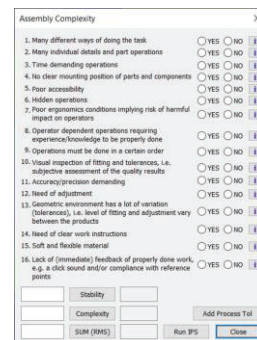
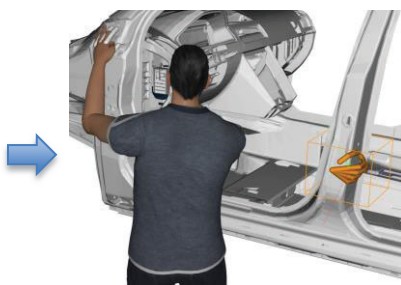
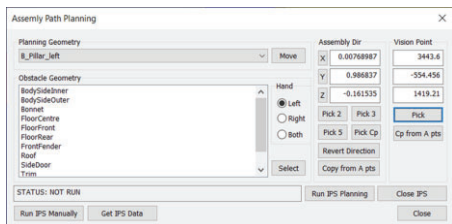
Demonstrator 1, analytisk bedömning av komplexitetskriterier

Utifrån RD&T simuleringsmodeller som redan byggs idag för att simulera geometrisk kvalitet har ett gränssnitt till IPS utvecklats där man baserat på redan inlagd information (inget dubbelarbete) skickar kommando till IPS som automatiskt bygger en simuleringsmodell i IPS och utför simulering och analys och returnerar resultatet till RD&T med endast några få knapptryckningar.

RD&T, val av vad som skall skickas till IPS, återvinning av redan existerande information => minskar dubbelarbete

IPS, simulering med manikin utförs automatiskt

RD&T, data från IPS bedömer monteringskomplexiteten analytiskt som input till konstruktionen



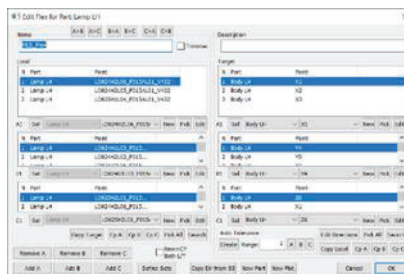
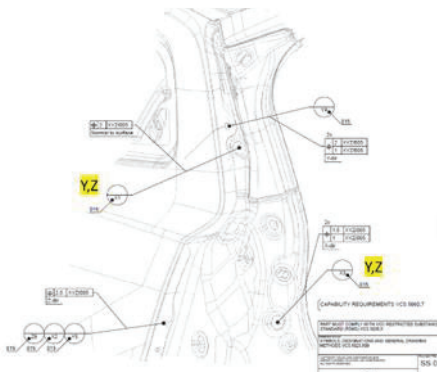
### Demonstrator 2, simulering av tjuvstyrning

En manuell analys behöver göras av konstruktionen för att identifiera vilka referenser som är mottagliga för tjuvstyrning (se fortsatt forskning i kap 8), dessa kan sen med ett enkelt kaptryck märkas ut i en befintlig RD&T modell (ingen ny simuleringsmodell behöver byggas upp). RD&T genererar sen alla tänkbara permutationer av refsystem och genomför variationssimulering för samtliga. Som resultat får man en variationsband innehållande, bästa, sämsta och tänkta refsystemet och detta kan användas som input till konstruktionsarbetet för att minimera påverkan av tjuvstyrning.

Analys görs av konstruktionen för att avgöra vilka referenser som kan tänkas tjuvstyra och dessa identifieras

RD&T, de tjuvstyrande referenserna markeras i RD&T, och sen räknas alla tänkbara felaktiga refsystem automatiskt ut och variationsimulering sker för alla

RD&T, simuleringsresultatet visas som en möjlig spridning mellan bästa och sämsta samt tänkta refsystemet



Flex Set	RMS
Original	2.06400
Set123142	1.67501
Set123131	6.87354

Projektet har bidragit till uppfyllandet av följande övergripande FFI-mål:

- att öka forsknings- och innovationskapaciteten i Sverige och därmed säkra fordonsindustriell konkurrenskraft och arbetstillfällen
  - Projektet har gett svensk fordonsindustri en fördel med simuleringsverktyg, metoder och kunskap som är unika och som inte finns i övriga världen.
- att främja medverkan av små och medelstora företag
  - RD&T Technology AB och IPS AB är två företag som startats för att kommersialisera tidigare forskningsresultat. Deras medverkan stärker projektets förmåga att nå ut med kommande forskningsresultat till användare i hela världen.
- att främja medverkan av underleverantörer
  - Plasman, RD&T, IPS och CEVT deltagar i projektet. Spridning till övriga underleverantörer och övriga svenska industrin har genomförts via spridningsaktiviteter tillsammans med RISE.

- att främja branschöverskridande samverkan
  - Projektet har utförts inom ramen för Wingquist Laboratory där bland andra IKEA, GKN och Sandvik är parter. Resultaten kommer att exponeras för dessa företag och på sikt kunna leda till nya branschöverskridande projekt.
- att främja samverkan mellan industri och universitet, högskolor och institut
  - Projektet kopplar samman två tidigare separata forskningsspår. Chalmers och Fraunhofer-Chalmers Center har utfört projektet gemensamt. Projektet har samlat svensk fordonsindustri.
- att främja samverkan mellan olika OEM
  - Att Volvo Cars, CEVT, NEVS och Scania utvecklar gemensamma verktyg och arbetssätt stärker deras konkurrenskraft och bidrar till kritisk massa inom området. Projektet har också stärkt fortsatt samverkan i framtiden och inkluderar en komponentleverantör till fordonsindustrin (Plasman). Övrig svensk industri tillgodogör sig resultaten via spridningsaktiviteter tillsammans med RISE.

När det gäller programmets delmål, har projektet bidragit med följande:

1. Nya produkter med hög livscykeeffektivitet: Förmåga att hantera nya produkter och material i produktionssystemet
  - Nya material, exempelvis metaller, keramer och kompositer för additiv tillverkning, skulle kunna ge upphov till nya monteringsproblem pga. annorlunda egenskaper än dagens (hårt, mjukt, sprött, ytfinhet mm.).
2. Konkurrenskraft: Kostnadseffektiva nya produktionssystem i ett globalt perspektiv
  - Färre fysiska serier för provbyggnation
  - Färre kassationer
  - Lägre kvalitetsbristkostnader
3. Miljö: Miljöneutral produktion och kretslopp för restprodukter och energi
  - Färre kassationer
  - Färre fysiska provobjekt
  - Bättre arbetsmiljö och ergonomi
  - Ökad jämställdhet då produkt och montering (åtkomst/krafter) kan anpassas till en bredare population av montörer
4. Kvalitet: Säkerställd önskad kvalitet
  - Högre geometrisk kvalitet
  - Bättre virtuella verktyg
  - Mindre efterjustering
5. Ledtid: Kortare ledtid genom hela försörjningskedjan i utveckling och produktion
  - Mindre fel när nya produkter/lösningar introduceras
  - Färre provobjekt
  - Färre fysiska serier för provbyggnation
  - Kortare tid för att trimma in produktionssystemet
  - Kortare tid för att lära upp montörer
6. Flexibilitet: Tillräckligt flexibla produktionssystem för efterfrågade komponenter
  - Manuell montering flexibelt och anpassningsbart till kontinuerliga ändringar och uppdateringar av produkten
  - Medger masskundanpassning av produkterna till låg produktionskostnad med kvalitetssäkrad manuell montering

## 7 Spridning och publicering

## 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Via forskning, fysiska tester, virtuell verifiering, presentationer på konferenser, vetenskaplig publicering, inslag i högskoleutbildningsprogram
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt		
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Delar av resultatet har redan implementerats i verktyg som används i industrin
Introduceras på marknaden	X	Delar av resultatet har redan kommersialiserats i IPS
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

## 7.2 Publikationer

Examensarbete:

- Analysis of Misconstraining during Manual Assembly at Volvo Cars (2021)  
A Novel Study on the Error Phenomenon and its Contributing Factors Connected to Geometry Assurance  
Erik Arvidsson, Vasanth Kumar
- Analyzing manual assembly complexity using a combination of RD&T and IPS  
IMMA (2022)  
Validation, proposal of improvements and suggested implementation of the software in the work process at CEVT  
Emelie Johansson, Isabella Sten

Konferenspublikationer:

- User-guided grasp planning for digital hand  
Yi Li (Fraunhofer-Chalmers Centre) , Niclas Delfs (Fraunhofer-Chalmers Centre) , Johan S. Carlson (Fraunhofer-Chalmers Centre)  
7th International Digital Human Modeling Symposium (DHM 2022), August 29–30, 2022, Iowa City, Iowa, USA

Journalpublikationer:

- Simulation of variation for manual assembly when mis-constraining occurs  
Journal of Engineering Design, 2023  
Mikael Rosenqvist, Lars Lindkvist, Kristina Wärmefjord and Rikard Söderberg  
(ej publikt publicerad än)
- Simulation of manual assembly complexity factors using CAT and DHM  
Journal of Engineering Design, 2023  
Mikael Rosenqvist, Lars Lindkvist, Kristina Wärmefjord and Rikard Söderberg  
(ej publikt publicerad än)

# 8 Slutsatser och fortsatt forskning

## 8.1 Slutsatser

Målet med projektet har varit att med hjälp av en manikin analytisk bestämma komplexitetsnivån för manuella monteringsoperationer för att uppnå bättre geometrisk kvalitet vid manuell



montering. Målet är uppnått med de metoder och verktyg som är resultatet av projektet. Flera av delresultat som uppnått i projektet har redan industrialiserats (av partners till projektet) och finns tillgängliga kommersiellt vilket får anses som en stor framgång.

Fenomenet tjuvstyrning har kunna påvisas i projektet och en mängd kunskap har adderats inom ämnet. Detta har genererat stort industriellt intresse och det behövs mera forskning inom området. Med tanke på den knappa forskningen om ämnet så får resultatet från projektet ses som mycket gott och som en god bas för fortsatt forskning.

## 8.2 Fortsatt forskning

Båda demonstratorerna är validerade med industriella case, men för att kunna industrialisera dessa krävs mer testning och finslipning av gränsvärdena för komplexitetskriterierna samt anpassa användarinterfacet till kommersiella verktyg.

I projektet så har en metod för att bedöma 9 komplexitetskriterier analytiskt tagits fram vilket är i linje med förväntningarna vid projektstart. Fortsatt forskning krävs för att undersöka hur man kan bedöma de kvarvarande 7 komplexitetskriterierna analytiskt.

Området tjuvstyrning vid manuell montering är som nämnt tidigare ett omoget forskningsområde. I detta projekt har en del grundläggande data samlats in och kunskapen om fenomenet har höjts. Men det finns en stor mängd forskning kvar att göra för att fullständigt förstå fenomenet. I resultaten har 3 sorters tjuvstyrning identifierats och en första metod för att simulera 2 av dem presenteras. Fortsatt forskning bör innefatta att undersöka om fler sorters tjuvstyrning finns, algoritmer för att automatiskt identifiera vilka referanser som kan tjuvstyra, tjuvstyrning när kollision inträffar mellan icke-styrande objekt, effekten av icke-stelhet etcetera. Intresset från industrin att gå vidare med att forska inom tjuvstyrning har uttryckts som stor i projektet.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

- Chalmers Tekniska Högskola
  - Rikard Söderberg

**CHALMERS**

- Fraunhofer-Chalmers Center
  - Johan Carlson



- Volvo Car Sverige
  - Alf Andersson
  - Maria Hellström
  - Dan Lämkuil

**V O L V O**

- CEVT
  - Henrik Svantesson

**CEVT**

- NEVS
  - Peter Josefsson

**NEVS**

- Scania CV
  - Lars Hanson
- Plasman
  - Sven Erixon
- RISE
  - Fredrik Wandebäck



## 10 Referenser

Ann-Christine Falck, Roland Örtengren, Mikael Rosenqvist, Rikard Söderberg, "Basic complexity criteria and their impact on manual assembly quality in actual production", International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 58, 2017, Pages 117-128, ISSN 0169-8141

Ann-Christine Falck and Roland Örtengren and Mikael Rosenqvist and Rikard Söderberg, "Proactive assessment of basic complexity in manual assembly: development of a tool to predict and control operator-induced quality errors", International Journal of Production Research, 55, 15, Pages 4248-4260, 2017

Ann-Christine Falck, Roland Örtengren, Mikael Rosenqvist, Rikard Söderberg, "Criteria for Assessment of Basic Manual Assembly Complexity", Procedia CIRP, Volume 44, 2016, Pages 424-428, ISSN 2212-8271

Fasth, Å. (2012), "Quantifying Levels of Automation - to enable competitive assembly systems", Chalmers University of Technology, Göteborg, ISBN 978-91-7385-718-5.

Mikael Rosenqvist, Ann-Christine Falck, Rikard Söderberg, "Including Measures of Assembly Complexity in Proactive Geometry Assurance, A Case Study", Procedia CIRP, Volume 44, 2016, Pages 151-156, ISSN 2212-8271

Shannon, C.E., Weaver, W. (1963), "The Mathematical Theory of Communication", University of Illinois Press Champaign, IL, USA, ISBN 0252725484.

Badler, N.I., Phillips, C.B., Webber, B.L. (1993). Simulating humans: Computer graphics animation and control. New York, USA. Oxford University Press.

Bohlin, R., Delfs, N., Hanson, L., Högberg, D., Carlson, J.S. (2012). Automatic Creation of Virtual Manikin Motions Maximizing Comfort in Manual Assembly Processes. Proceedings of the 4th CIRP Conference On Assembly Technologies And Systems, Hu, S.J. (Ed.), USA, May 2012, pp. 209-212. ISBN 978-0-615-64022-8

Brolin, E., Högberg, D., Hanson, L., Örtengren, R. (2017). Adaptive regression model for synthesizing anthropometric population data. International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 59, pp. 46-53.

Fritzsche, L., Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., Jäckel, T., Pirger, A. (2011). Introducing ema (editor for manual work activities): a new tool for enhancing accuracy and efficiency of human simulations in digital production planning. Digital Human Modeling, Lecture Notes in Computer Science, Volume 6777, 272-281.

Högberg, D., Hanson, L., Bohlin, R., Carlson, J. S., (2016) Creating and shaping the DHM tool IMMA for ergonomic product and production design, *International Journal of the Digital Human*, Vol 1, No. 2, pp. 132-152.

Meynard, H.B., Stegemerten, G. J., Schwab, J. L. (1948). *Method-time-measurement*. New York McGraw-Hill.

Mårdberg, P., Carlson, J.S., Bohlin, R., Delfs, N., Gustafsson, S., Högberg, D., Hanson, L. (2014). Using a Formal High-Level Language and Automated Manikin to Automatically Generate Assembly Instructions. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation (IJHFMS)*, Vol. 4, No. 3/4, pp. 233-249.

Rasmussen, J., Vondrak, V., Damsgaard, M., de Zee, M., Tørholm Christensen, S. (2002). The AnyBody project - Computer analysis of the human body, In: *Computer Analysis of the Human Body. Biomechanics of Man*, pp. 270-274, The Czech Society of Biomechanics, Cejkovice, Czech Republic.

Rhén, I.M., Forsman, M., Örtengren, R., Högberg, D., Keyvani, A., Lämkuil, D., Hanson, L. (2018). Ergonomic Risk Assessment in DHM tools Employing Motion Data – Exposure Calculation and Comparison to Epidemiological Reference Data. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, Vol. 6 (1), 31-64.

Seidl, A. (1997) RAMSIS, a new cad tool for ergonomic analysis of vehicles developed for the German automotive industry. *Automotive concurrent/simultaneous engineering*, SAE Special Publications, Vol. 1233, pp. 51-57.

Wiklund, M. A. (1990). SAM: sekvensbaserad aktivitets- och metodanalys : MTM-baserat analyssystem för arbetsmätning: snabbt – enkelt, Stockholm : Sveriges rationaliseringsförbund. (SRF).

Zandin, K. (1990). MOST Work Measurement Systems. M. Dekker ISBN 0824776046, 9780824776046.

Yang, J., Marler, T., Kim, H., Farrell, K., Mathai, A., Beck, S., Abdel-Malek, K., Arora, J., Nebel, K. (2005) Santos™: A New Generation of Virtual Humans, SAE Technical Paper No 2005-01- 1407, Warrendale, USA.

Morse E. Morse, et al. "Tolerancing: Managing uncertainty from conceptual design to final product." *CIRP Annals* 67.2,695-717, (2018)

Hong, Y. & Chang, T.C., 2002, "A comprehensive review of tolerancing research", *International Journal of Production Research*, 40(11), pp.2425-59.

Coletti, P. & Aichner, T. 2011, "Mass Customization: An Exploration of European Characteristics", Heidelberg; New York, Springer.