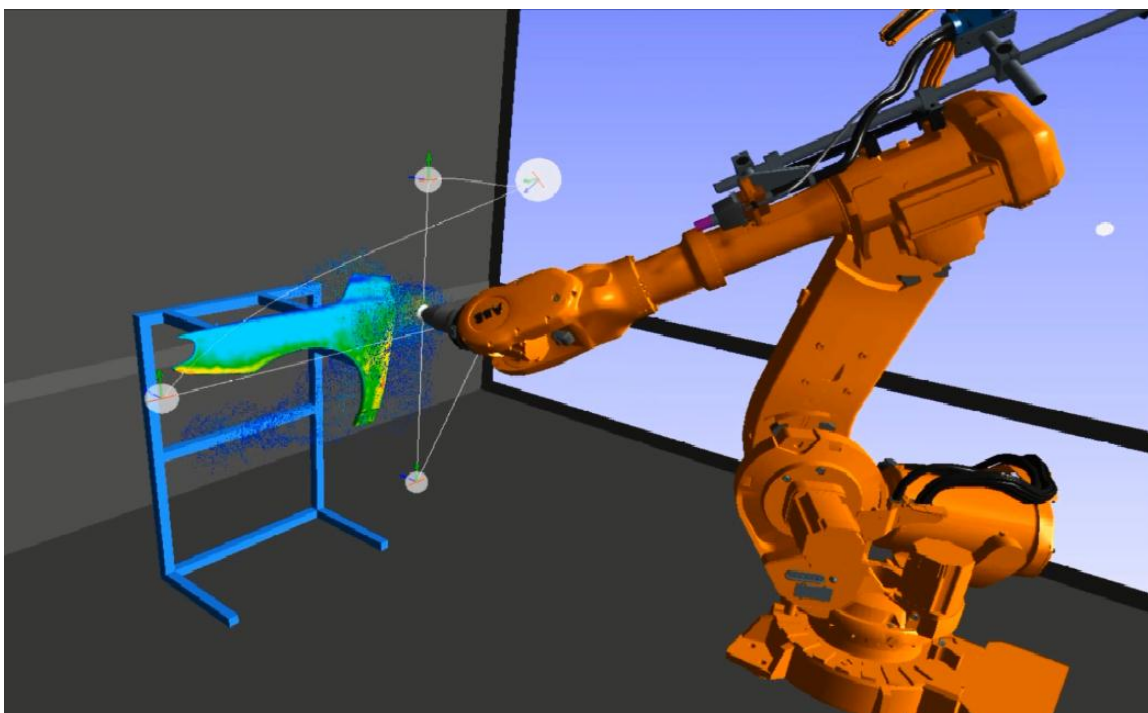


FFI

FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Den virtuella målerifabriken



Författare: Johan S. Carlson, Fredrik Edelvik, Henrik Söröd, Jörg Wohner

Datum: 2013-02-28

Delprogram: Hållbar Produktionsteknik

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	5
4. Genomförande.....	6
4.1 Arbetspaket	6
5. Resultat	8
5.1 Bidrag till FFI-mål	11
6. Spridning och publicering.....	12
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	12
6.2 Publikationer	13
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	14
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	15

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på www.vinnova.se/ffi

1. Sammanfattning

Ytbehandlingen är den process i en fordonsfabrik som förbrukar mest energi, vatten och kemikalier samt producerar mest avfall och utsläpp. Måleriet står till exempel för ungefär 36 procent av energiförbrukningen i en fordonsfabrik. Virtuella verktyg är idag vanligt förekommande för att stötta en effektiv produkt och produktionsutveckling men detta gäller inte i måleriet. I måleriet är produktionsberedningen, där robotbanor och processparametrar finjusteras, en långsam och kostsam process baserad på individuell erfarenhet och testning på ett stort antal prototyper. Måleriet har därför inte bara en stor miljöpåverkan det är också en flaskhals i produktion.

Dagens marginaler är små för fordonstillverkarna och konkurrensen stenhård. För att understödja en hållbar produktion och effektiv produktframtagning så är nya virtuella verktyg för simulering och optimering nödvändiga, och kan ge en konkurrensfördel. Det övergripande målet för projektet är att utveckla unika matematik-baserade metoder och verktyg för simulering av nyckelprocesserna för målning och ytbehandling inom fordonsindustrin. Målet är att med hjälp av dessa verktyg så ska deltagande företag kunna utveckla och optimera sina nuvarande och framtida ytbehandlingsprocesser

- att bli mer miljövänliga,
- att bli mer energieffektiva,
- att bli mer kostnadseffektiva,
- att ge en bättre produktkvalitet.

De specifika målen är

- Metoder och verktyg som noggrant kan prediktera färgtjocklek på en komplex karossdetalj med endast några timmars simuleringstid på en standard Laptop.
- Metoder för simulering av färggupp brytning för att minska behovet av avancerade mätningar av hastigheter och storleksfördelningar nära applikatorn.
- Metoder och verktyg för noggrann prediktering av nedläggning av tätningssmassa och automatisk generering av kollisionss fria robotbanor.
- Metoder och ett prototypverktyg för simulering av åtkomst och tömning av vätska då en full bilkaross doppas i ett elektrolytbad.
- Metoder och prototypverktyg som integrerar scanning och banplanering för automatisk generering av robotbanor för sprutmålning av lågvolymprodukter.

Detta projekt täcker in alla nyckelprocesser inom sprutmålning och ytbehandling i fordonsfabrikernas målerier. De första sju arbetspaketen fokuserar på modellering och simulering av de olika processerna och de övriga tre paketen behandlar validering och mätning, demonstratorer och projektledning. Den allmänna strategin är att utveckla och implementera modeller som kontinuerligt valideras mot experiment. Först på enklare, men representativa, testfall och senare på mer komplexa fullskala-fall. Resultaten integreras på mjukvaruplattformen IPS som är tillgänglig för projektets parter.

Projektet har utförts i följande arbetspaket:

- WP1: Modellering och simulering av färguppbyggnad vid elektrostatiske sprutmålning,
- WP2: Modellering och simulering av nedläggning av tätningssmassa,
- WP3: Modellering och simulering av åtkomst och tömning av vätska i elektrolytbad,
- WP4: Automatisk generering av robotbanor genom 3D skanningsteknologier,
- WP5: Modellering och simulering av ugnshärdning,
- WP6: Optimering av processhål för ytbehandling av bilkarosser,
- WP7: Termisk sprutning,
- WP8: Mätningar och validering,
- WP9: Demonstratorer,
- WP10: Projektledning.

Projektresultaten visar att det är möjligt att noggrant simulera sprutmålning av en komplex karosdetalj på endast några timmar på en standarddator. Detta är en extrem förbättring jämfört med existerande lösningar som kräver veckolånga simuleringar. Detta har uppnåtts genom utvecklingen av unika algoritmer för simulering av luftflöden, elektrostatiske fält och laddade färgpartiklar. Flera framgångsrika mätkampanjer har utförts med mycket bra överensstämmelse mellan simuleringens resultat och mätningar. Ett liknande genombrott har åstadkommit för simulering av nedläggning av tätningssmassa. Metoderna och algoritmerna är integrerade i CAE-verktyget IPS och är redo för industriell implementering. Genom integration och vidareutveckling av tillgängliga teknologier för banplanering, 3D-skanning och sprutmålningssimulering så har en första ansats för att automatiskt generera färgtäckande robotbanor baserat på en analys av komponentens yta utvecklats.

För elektrodoppet så visar resultaten stor potential för noggrann analys av åtkomst och dränering av vätska, vilket inte är möjligt med dagens verktyg. Den långsiktiga finansieringen av Vinnova har gjort det möjligt att bygga upp en världsledande gruppering för målning och ytbehandlingsprocesser med expertkunskap om de industriella processerna, modellering och simulering, samt avancerad mätning och validering.

2. Bakgrund

Ytbehandlingen är den process i en fordonsfabrik som förbrukar mest energi, vatten och kemikalier samt producerar mest avfall och utsläpp. Måleriet står till exempel för ungefär 36 procent av energiförbrukningen i en fordonsfabrik. Dagens produktberedning, där robotbanor och processparametrar finjusteras med hjälp av individuell erfarenhet och testning på ett stort antal prototyper, är både långsam och dyr. Resultaten beror starkt på hur väl processingenjörerna har lyckats ställa in parametrarna. Arbetet kompliceras av att varje kombination av produktspecifikation, materialspecifikation, produktdesign och

utrustningsdesign är unik och en liten avvikelse kan ha stor påverkan på resultatet. Defekter som upptäcks sent i produktion, eller ännu värre i konsumentledet, kan bli extremt dyra att hantera.

Det finns därför ett mycket stort behov av att förbättra produktionsberedningen och det är absolut nödvändigt för att möta framtida krav på snabb anpassning och skräddarsydda lösningar för nya materialkombinationer och produkter. Möjligheten att utföra systematiska simuleringar är då väsentligt och skulle bidra till en hållbar produktion genom att reducera antalet prototyper som behöver målas, och genom att göra det möjligt att optimera processerna med avseende på kvalitet, kostnad och miljöpåverkan.

Men sprutmålning och övriga ytbehandlingsprocesserna utgör enorma utmaningar för matematisk modellering och simulering. De karakteriseras av flerfas och ytflöden, multifysik, flerskale-fenomen, och stora rörliga geometrier. Mjukvara för att simulera dessa processer saknas därför på marknaden eller har mycket begränsad funktionalitet.

3. Syfte

Syftet med projektet är att utveckla unika matematik-baserade metoder och verktyg för simulering av målnings och ytbehandlingsprocesserna i fordonsfabrikens måleri och integrera dessa i en användarvänlig demonstrator. Målet är att med hjälp av dessa verktyg så ska deltagande företag kunna utveckla och optimera sina nuvarande och framtida ytbehandlingsprocesser

- att bli mer miljövänliga,
- att bli mer energieffektiva,
- att bli mer kostnadseffektiva,
- att ge en bättre produktkvalitet.

De specifika målen är

- Metoder och verktyg som noggrant kan prediktera färgtjocklek på en komplex karossdetalj med endast några timmars simuleringstid på en standard Laptop.
- Metoder för simulering av färggupp brytning för att minska behovet av avancerade mätningar av hastigheter och storleksfördelningar nära applikatorn.
- Metoder och verktyg för noggrann prediktering av nedläggning av tätningsmassa och automatisk generering av kollisionsfria robotbanor.
- Metoder och ett prototypverktyg för simulering av åtkomst och tömning av vätska då en bilkaross doppas i ett elektrolytbad.
- Metoder och prototypverktyg som integrerar skanning och banplanering för automatisk generering av robotbanor för sprutmålning av lågvolymsprodukter.

4. Genomförande

Detta projekt täcker in alla de centrala målning- och ytbehandlingsprocesserna i måleriet på en fordonsfabrik. De första sju arbetspaketen fokuserar på modellering och simuleringsaspekter medan övriga tre arbetspaket behandlar mätning och validering, demonstratorer och projektledning. Resultaten implementeras kontinuerligt på IPS-plattformen som är tillgänglig för projektets parter.

4.1 Arbetspaket

WP1: Modellering och simulering av färguppbyggnad vid elektrostatiske sprutmålning

Detta arbetspaket har utförts som ett doktorandprojekt. Doktoranden Björn Andersson är anställd vid FCC och har handledts av forskare vid FCC samt professorer vid avdelning för fluiddynamik vid Chalmers. Disputationen är planerad till tidig höst 2013. Målet med arbetet är att genom modellering och simulering av uppbyggnaden av färg i droppar nära applikatorn kunna minska behovet av dyra och omständiga mätningar av droppstorleksfördelningar och hastigheter, som i nuläget används som indata för simuleringarna av färgtjocklek. Modeller för den sekundära uppbyggnaden har utvecklats och validerats, och detaljerade simuleringar av den primära uppbyggnaden av vattendroppar har utförts. Ett huvudfokus har varit den automatiska genereringen av indata för färgtjocklekssimuleringarna med hjälp av detaljerade simuleringar nära applikatorn.

Sprutmålningsdemonstratorn har färdigställts för användning i produktion och validerats i ett flertal mätkampanjer vid Swerea IVF, Fraunhofer IPA and GM.

WP2: Modellering och simulering av nedläggning av tätningssmassa

En fordonskaross består av många detaljer som har satts ihop med hjälp av svetsning eller någon annan sammanfogningsteknik. Det är oundvikligt att den slutliga designen av golv, dörrar, motorhuv och baklucka innehåller ett antal hålrum som behöver tätas för att undvika rostproblem. I detta arbetspaket har fokus varit på att utveckla och implementera matematiska algoritmer för processsimulering av nedläggning av tätningssmassa. För att verifiera simuleringarna så har resultaten jämförts med mätningar på ett antal testplattor med olika applikatorer och tätningssmaterial. Mycket arbete har ägnats åt att göra en effektiv implementation som möjliggör att inkludera detaljerade simuleringar i produktionsberedningen och off-line programmeringen av sealingrobotarna.

WP3: Modellering och simulering av åtkomst och tömning av vätska i elektrolytbad

För att skydda fordonet från rost så doppas det i ett bad med en elektrolytisk vätska. Genom en elektrokemisk process byggs ett skyddande lager upp på utsatta ytor. Det är kritisk att processen och produkten designas så att luftfickor undviks då objektet sänks ned i badet och att vätskan rinner ut ur alla hålrum då objektet lämnar badet. En dynamisk simulering med ett rörligt fordon i badet är extremt utmanande för simuleringsmetoderna och kräver algoritmer som effektivt kan hantera tvåfasströmning och multi-skala fenomen. Fokus i detta arbetspaket har varit modelleringen och simuleringen av åtkomst och tömning av vätska utan hänsyn till de elektrokemiska effekterna. En unik Volume of Fluids (VOF) metod har utvecklats för tvåfasströmningen. Validering av simuleringsresultat har skett med hjälp av en testlåda och potentialen har demonstrerats genom att simulera doppet av en hel bil.

WP4: Automatisk generering av robotbanor genom 3D skanningsteknologier

Detta arbetspaket behandlar målning av komplexa komponenter i lågvolymsier, vilka för närvarande i stor utsträckning målas manuellt på grund av ledtiden för att programmera en målningsrobot. Genom att koppla ihop och vidareutveckla tillgängliga tekniker för banplanering, 3D skanning och sprutmålningssimulering, är målet att automatiskt kunna generera optimala robotarbanor från en analys av komponentens yta. Detta förväntas leda till mer automatisering och en bättre kvalitet.

Arbetet har inkluderat utveckling av algoritmer för automatisk generering av täckande kurvor för komplexa ytor. Algoritmerna för kollisionsfri kurvföljning har vidareutvecklats i detta arbetspaket till multipla TCPs och banplaneraren har utvidgats till att hantera hybrida modeller med en mix av trianglar och skannade punktmoln. Den automatiska kurvgenereringen inkluderar följande steg: (i) Hitta lovande konfigurationer och rörelser som kan utföra varje stråk/kurva, (ii) sekvensoptimering och rörelseplanering för att välja en lösning för varje stråk/kurva och knyta ihop dem med effektiva rörelser så att cykeltiden minimeras.

WP5: Modellering och simulering av ugnshärdning

Detta arbetspaket byggde på ett fristående ugnshärdningsprojekt på Volvo Personvagnar som inte startade. Trots detta så har en del arbete utförts på metod och algoritmutveckling för simulering av konvektions och IR-ugnar. Ett framtida forskningsprojekt skulle dra fördel av dessa resultat.

WP6: Optimering av processhål för ytbehandling av bilkarosser

Designen och positionen av processhål är viktigt för åtkomst och tömning av vätska under elektrodoppet, som behandlas i WP3. Leveransen från detta arbetspaket inkluderade en visualisering i demonstratorn för att stötta en manuell optimering av placeringen av processhål.

WP7: Termisk sprutning

I detta arbetspaket så har modellerna och simuleringsteknikerna som utvecklades för sprutmålning i ett tidigare projekt applicerats på termisk sprutning. Målet har varit att uppskatta arbetet som krävs för att utvidga teknikerna till att också hantera denna tillämpning. Termisk sprutning används bland annat vid ytbehandling av flygmotorkomponenter och turbiner. Arbetet utfördes som ett exjobb i samarbete med Volvo Aero (GKN). För validering jämfördes tjockleken av det uppbyggda skiktet på en testgeometri med mätningar.

WP8: Mätningar och validering

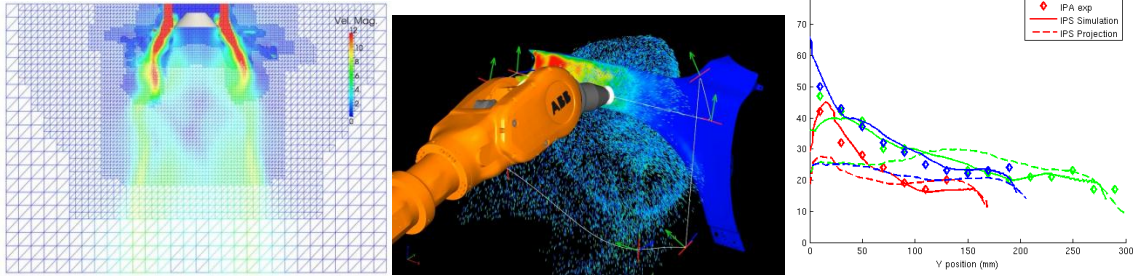
I detta paket så har mätmetoder utvecklats och mätningar har utförts för att validera metoderna och algoritmerna som utvecklats inom WP1-7.

WP9: Demonstratorer

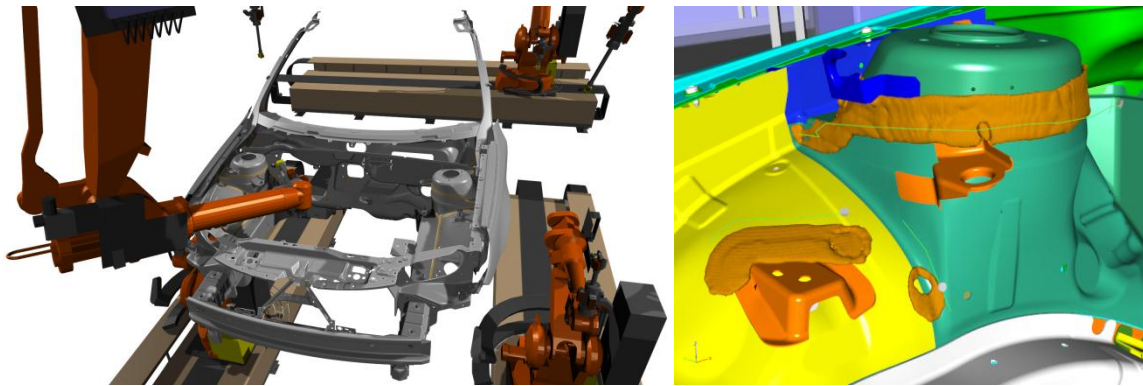
Leveransen i detta arbetspaket har varit demonstratorer på IPS plattformen som integrerar metoder och algoritmer utvecklade inom WP1-6.

5. Resultat

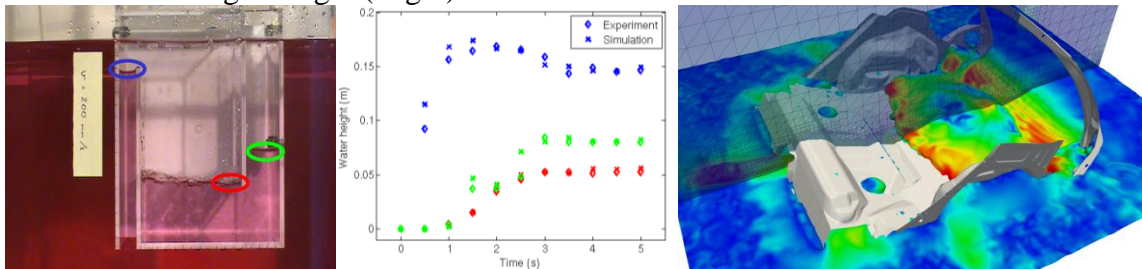
Unika metoder och verktyg har utvecklats som för första gången gör det möjligt att noggrant simulera både sprutmålning och nedläggning av tätningssmassa på komplexa detaljer med endast några timmars simuleringstid på en standarddator. Det enda verktyget på marknaden kräver veckolånga simuleringar för motsvarande analyser. Metoderna och verktygen har genomgått en omfattande validering på relevanta industrifall med mycket god överensstämmelse mellan mätningar och simuleringresultat. De snabba simuleringarna gör det möjligt att använda detaljerade simuleringar i produktionsberedningen och off-line programmeringen av målning och tätningrobotorna. De nya metoderna för uppbrytningssimulering reducerar kraftigt behovet av dyra mätningar av hastigheter och storleksfördelningar i området nära applikatoren. Dessutom gör det sprutmålningssjukvaran enklare att använda och underlättar spridning av sjukvaran till andra företag. Inom forskningen på numeriska metoder så är den unika volume of fluids metoden en verklig höjdpunkt från projektet. Flera alternativ finns publicerade men de kräver alla omfattande parameterjusteringar och sätter stora begränsningar på beräkningsnätet för att fungera. Vår lösning är stabil och tillåter adaptiva beräkningsnät, vilket ger en stor förbättring av prestandan. Den nya metoden har starkt bidragit till resultaten i WP2 och WP3.



Figur 1. Ögonblicksbild från en närklockesimulering (vänster). En robot målar en framskärm i IPS Virtual Paint (mitten). Validering av färgtjocklek på en målad framskärm (höger).

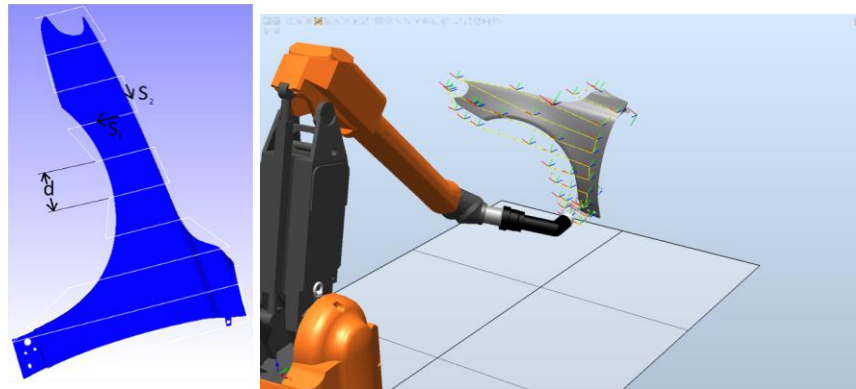


Figur 2. En robot applicerar tätningsmassa i IPS Virtual Sealing (vänster). Exempel på simulerade tätningssträngar (höger).



Figur 3. Jämförelse av vattenhöjd i ett testobjekt på tre olika ställen (vänster, mitten). Del av en Volvo V60 doppad i ett vattenbad – notera hur vätska tränger in genom hålen (höger).

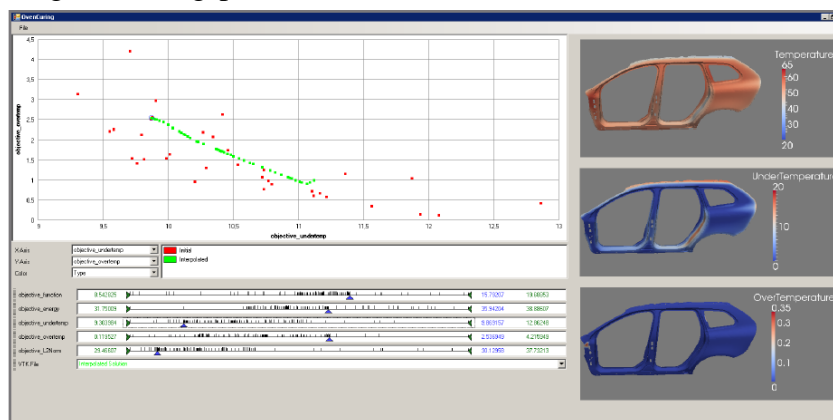
Ett första program för automatisk generering av robotbanor för en allmän geometri har utvecklats i ett kandidatarbete vid Swerea IVF. Tanken är att skapa bra banor i datorn istället för att testmåla den riktiga produkten. Programmet använder en CADbeskrivning eller en skannad geometri som indata. Målerioperatören specificerar ett antal indataparametrar och en serie av geometrievalueringar som används för att räkna ut den kortaste banan som ger färgtäckning på hela objektet. Genom att utföra simuleringar i IPS Virtual Paint så får operatören ett värdefullt stöd för att generera en optimal robotbana. Testning har utförts för implementation i en robot controller (ABB RobotStudio) och har skapat ett stort intresse i industrin.



Figur 4. Exempel på en automatiskt genererad bana som körts i RobotStudio.

Utveckling av ett alternativt och mer generellt tillvägagångssätt för generering av banor pågår. Ansatsen består av de tre stegen (i) skapa startsegment, (ii) bestäm avståndet mellan olika segment/stråk, och (iii) finjustera hastigheten längs segmenten. Startsegmentet väljs för att minimera antalet svängar och riskerna för överlapp i segmenten. Detta görs genom att skapa en nästan geodesisk kurva mitt på ytan.

Givet den enorma komplexiteten i ytbehandlingsprocesserna så har fokuset i nästan alla arbetspaket varit att kunna utföra detaljerade simuleringar. Men, det ultimata målet är naturligtvis att optimera processerna. I Figur 5 så visas en prototyp av ett beslutsstödssystem baserat på flermålsoptimering. Operatören kan använda verktyget för att navigera fram till en lösning som är en gynnsam kompromis mellan kvalitet, kostnad och stabilitet för ugnshärdningsprocessen.



Figur 5. Ett beslutsstödssystem för ugnshärdning baserat på flermålsoptimering.

Verktygen som utvecklats i projektet testas av flera av företagen och sprutmålning och tätningsmodulerna beräknas att finnas kommersiellt tillgängliga under 2013. Vidare har arbetet resulterat i sex tidskriftsartiklar, nio konferensbidrag, tre examensarbeten och en licentiatavhandling. En doktorsavhandling i fluidynamik kommer under hösten 2013.

Relaterade tekniska höjdpunkter från projektet är:

- En unik volume of fluid metod för robusta flerfassimuleringar
- En publicerad andra ordningens metod för inbäddade ränder som kan hantera tunna objekt
- En publicerad metod för inbäddade ränder för flöden med värmeledning
- En implicit lösare för momentumekvationerna i SPH som kan använda 10-100 gånger längre tidssteg
- En MPI parallellisering av fluidlösaren IBOFlow
- Lösning av ekvationssystemen med iterativa lösare implementerade på grafikkort
- Uppbrytning av en liten bubbla genom VOF-simuleringar
- En ny metod för optimering av robotbanor för semi-komplexa objekt
- En statistisk diffusions-densitet metod för färgtjockleksintegration

5.1 Bidrag till FFI-mål

- I projektet har metoder, algoritmer och mjukvara utvecklats som bidrar till hållbara produktion genom att signifikant öka produktiviteten i beredningsprocessen eftersom färre prototyper behöver målas. Cykeltiden kan minskas genom att optimera robotbanor och lastbalansera robotarnas arbete. Miljöpåverkan kan reduceras genom att välja robotbanor och processparametrar som minimerar färgspill.
- Genom att kunna utföra mer av produktionsberedningen offline så kan nya produkter introduceras med kortare ledtider.
- Genom att erbjuda en effektiv och lättanvänd mjukvara för simulering av ytbehandlingen så kan fler företag ta steget från manuell till automatiserad sputmålning med stora vinster i effektivitet, produktkvalitet och arbetsmiljö.
- Projektet har ytterligare stärkt den världsledande forskargrupperingen inom ytbehandlingsprocesser som bidrar till en konkurrenskraftig fordonsindustri i Sverige.
- Det matematikbaserade tillvägagångssättet i projektet är en nyckel för att möta framtidens utmaningar i målerierna i form av ett ökat antal produkter och materialvarianter.
- Ökar användningen och förståelsen för avancerad matematik i produkt och produktionsutvecklingen.
- Ökar samarbetet mellan industri och forskningsinstitut.
- Resulterade under 2012 i en licentiatavhandling och kommer under 2013 att resultera i en doktorsavhandling vid Chalmers inom fluiddynamik.
- Projektet har ytterligare förstärkt Sveriges konkurrenskraft som avancerad användare och utvecklare av digitala verktyg i gränslandet mellan produkt och produktion.

- Forskargruppen i Geometri och Rörelseplanering vid FCC som är en del av Wingquist laboratoriet har vuxit från 9 (2009) till 17 forskare.
- Forskargruppen inom Beräkningsteknik och Design vid FCC har vuxit från 6 (2009) till 11 forskare.
- Mjukvaruplattformen IPS för matematik-baserad virtuell produktutveckling har vidareutvecklats och kommer fortsätta att säkra en omfattande och snabb implementering av forskningsresultat, liksom att förenkla teknologiutbyte mellan industriparterna.

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Projektet har resulterat i ett ökat intresse för simulering av målning och ytbehandlingsprocesser för att kunna reducera tiden för introduktion av nya modeller, reducera cykeltiden, minska miljöpåverkan, och öka produktkvaliteten. Under 2013 så kommer Volvo Personvagnar att utföra ett implementeringsprojekt tillsammans med FCC för att kunna dra full nytta av projektresultaten inom sprutmålning. General Motors har utfört ett flertal mätkampanjer under projektet och kommer att utföra validering på komplett bil under 2013. Scania har valt IPS som en nyckelplattform för simulering av målning och ytbehandlingsprocesser. AB Volvo har investerat i ett pågående projekt där ett prototypsystem för manuell målning utvecklas delvis baserat på projektresultaten. Vidare så har resultaten genererat ett stort internationellt intresse och kommer till exempel att presenteras för den tyska ytbehandlingsindustrin på en konferens i Potsdam i maj 2013.

Scania, AB Volvo, Volvo Cars, och Swerea IVF är tillsammans med några företag från fordonskomponentgruppen involverade i det pågående projektet "The Virtual Paint Shop – Powder and Externally Charged Wet Paint", där metoder och verktyg vidareutvecklas för ytbehandlingsprocesser som används av den tunga fordonsindustrin och är vanliga inom övrig industri.

Projektresultaten och demonstratorer har kontinuerligt presenterats vid företagsbesök, seminarier och utbildningar. Några exempel är

- Mötesplats för framtidens framgångsrika verkstäder, Katrineholm, maj 2010.
- Wingquist Laboratory International Seminar, Göteborg, december, 2010.
- Mötesplats för framtidens framgångsrika verkstäder, Katrineholm, maj 2011
- Scanautomatic fair in October at Stockholmsmässan, oktober 2011.
- Mötesplats för framtidens framgångsrika verkstäder, Katrineholm, maj 2012
- Wingquist Laboratory International Seminar, Göteborg, december 2011.
- ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012.

- 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, september 2012.
- ABB workshop om sprutmålning, november 2012.
- Swedish Production Symposium SPS12, Linköping, november 2012.
- Wingquist Laboratory International Seminar, Göteborg, december 2012.
- Volvo Cars Manufacturing Research & Advanced Engineering Seminar, februari 2013.
- Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung, maj 2013.

6.2 Publikationer

1. B. Andersson, V. Golovitchev, S. Jakobsson, A. Mark, F. Edelvik, L. Davidson, J.S. Carlson, "Modified TAB Model for Viscous Fluids applied to Breakup in Rotary Bell Spray Painting", submitted to Journal of MultiPhase Flows, 2013.
2. A. Mark, B. Andersson, S. Tafuri, K. Engström, H. Söröd, F. Edelvik, J. S. Carlson, "Simulation of Electrostatic Rotary Bell Spray Painting in Automotive Paint Shops", submitted to Atomization and Sprays, 2012.
3. A. Mark, E. Svenning, F. Edelvik, "An Immersed Boundary Method for Simulation of Flow with Heat Transfer", International Journal of Heat and Mass Transfer, 56:424-435, 2013.
4. A. Mark, R. Rundqvist, F. Edelvik, "Comparison Between Different Immersed Boundary Conditions for Simulation of Complex Fluid Flows", Fluid Dynamics & Materials Processing, 7(3):241-258, 2011.
5. R. Rundqvist, A. Mark, F. Edelvik, J. S. Carlson "Modeling and simulation of viscoelastic fluids using Smoothed Particle Hydrodynamics", Fluid Dynamics & Materials Processing, 7(3):259-278, 2011.
6. Robert Rundqvist, Andreas Mark, Björn Andersson, Anders Ålund, Fredrik Edelvik, Sebastian Tafuri, and Johan S Carlson, "Simulation of Spray Painting in Automotive Industry", In G. Kreiss et al. (eds.), Numerical Mathematics and Advanced Applications 2009, pp. 769-777, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
7. H. Söröd, R. Ingemarsson, A. Mark, R. Bohlin, D. Segerdahl, F. Edelvik, J.S. Carlson, "3D Scanning and Automatic Path Planning of Paint Process in General Coating Industry", Swedish Production Symposium SPS12, Linköping, November 2012.
8. A. Mark, R. Bohlin, D. Segerdahl, F. Edelvik, J. S. Carlson, "Optimization of Robotized Sealing Stations in Paint Shops by Process Simulation and Automatic Path Planning", Swedish Production Symposium SPS12, Linköping, November 2012.
9. S. Tafuri, F. Ekstedt, J. S. Carlson, A. Mark, F. Edelvik, "Improved Spray Paint Thickness Calculation From Simulated Droplets Using Density Estimation", Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012, Chicago, IL, USA
10. B. Andersson, V. Golovitchev, S. Jakobsson, A. Mark, F. Edelvik, L. Davidson, J.S. Carlson, "Modified TAB Model for Viscous Fluids applied to Breakup in Rotary Bell Spray Painting", Proc. 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, 2012.
11. A. Mark, B. Andersson, S. Tafuri, K. Engström, H. Söröd, F. Edelvik, J. S. Carlson, "Simulation of Electrostatic Rotary Bell Spray Painting in Automotive Paint Shops", Proc. 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, 2012.
12. M. Pieper, P. Klein, K-H Küfer, A. Mark, F. Edelvik, "Multi-objective Optimization of Oven Curing in Automotive Paint Shops", In The 21st International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Jyväskylä, Finland, June 2011.
13. Björn Andersson, Stefan Jakobsson, Andreas Mark, Fredrik Edelvik, Lars Davidson, "Modeling Surface Tension in SPH by Interface Reconstruction using Radial Basis Functions", In proceedings of the 5th International SPHERIC Workshop, pp. 7-14, Manchester, U.K., June 2010.

14. A. Mark, R. Rundqvist, F. Edelvik, "Comparison Between Different Immersed Boundary Conditions for Simulation of Complex Fluid Flows", 7th International Conference on Multiphase Flow (ICMF), Tampa, FL, USA, June 2010.
15. R. Rundqvist, A. Mark, F. Edelvik, J. S. Carlson "Modeling and simulation of viscoelastic fluids using Smoothed Particle Hydrodynamics", 7th International Conference on Multiphase Flow (ICMF), Tampa, FL, USA, June 2010.
16. B. Andersson, "Droplet Breakup in Automotive Spray Painting", Lic. thesis at FCC, Chalmers University of Technology, January 2012.
17. A. Berce, "Simulation of Thermal Spraying in IPS Virtual Paint", MSc thesis at FCC, Chalmers University of Technology, June 2011.
18. L. A. Martinez, "Near-bell simulations", MSc thesis at FCC, Chalmers University of Technology, June 2012.
19. R. Ingemarsson, "Virtual paint - scanning and path planning", BSc thesis at Swerea IVF, May 2012.
20. L. Quan, M. Pourghahreman, "Sealing simulations in IPS Virtual Sealing", MSc thesis at Volvo Cars, Chalmers University of Technology, June 2012.

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Projektresultaten visar att det är möjligt att noggrant simulera sprutmålning av en komplex karossdetalj på endast några timmar på en standarddator. Detta är en extrem förbättring jämfört med tidigare ansatser som krävde veckolånga simuleringstider. Detta har åstadkommits genom unika algoritmer för simulering av luftflöden, elektrostatiska fält och laddade färgpartiklar. Flera mätkampanjer har genomförts med mycket bra resultat. Ett liknande genombrott har uppnåtts för simulering av tätningsmassa. Metoderna är implementerade i CAE verktyget IPS och redo för industriell implementation. Den långsiktiga finansieringen från Vinnova har gjort det möjligt att bygga upp en världsledande gruppering inom modellering och simulering av målning och ytbehandlingsprocesser.

För elektrodoppet och ugnshärdningstillämpningarna så har projektet resulterat i nya metoder och första versioner av demonstratorerna. Dock krävs ytterligare forskningsprojekt för att nå en industriell implementeringsnivå.

I det pågående Vinnovaprojektet (Dnr 2012-02148) vidareutvecklas metoder och verktyg för simulering av pulver och externt laddad våtlack. När detta projekt har genomförts så kan alla vanliga sprutmålningstekniker hanteras vilket kraftigt underlättar teknikspridningen till andra branscher. Pulverlackering är en stor industri i Sverige med en årlig förbrukning på 9000 ton. Ungefär 400 företag lackerar hundratals produkter såsom möbler, hushållsprodukter och fönster för att nämna några. Den stora utmaningen inom denna utvidgning är att kunna simulera koronarladdningen vid elektrodnålen och uppladdningen av färgpartiklarna då de passar koronaregionen.

Den långsiktiga visionen med forskningen inom virtuell målning är att radikalt rationalisera ytbehandlingen inom svensk tillverkningsindustri genom att utveckla simuleringsverktyg som gör det möjligt att fullständigt automatisera

produktionsberedningen i målerifabrikerna. Med en geometribeskrivning och tillgängliga penslar som indata så beräknas optimala robotbanor och processparameterar som garanterar en viss färgtäckning och visuella resultat som färgmatchning och glans. Detta är naturligtvis extremt komplicerat men forskargrupperingen har en byggt upp en unik plattform och kompetens för att kunna tackla denna svåra utmaning. Om det lyckas så skulle det dramatiskt förbättra produktiviteten och reducera miljöpåverkan i såväl beredning som i produktion.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektet har varit ett samarbete mellan företagen Volvo Personvagnar, SAAB Automobile, AB Volvo, Scania CV and Konga Bruk, och forskningspartners Fraunhofer-Chalmers Research Center (FCC) och Swerea IVF. En styrgrupp med en representant per part har utsetts för att leda projektet. Styrgruppen har ansvarat för projektuppföljning, finansiering och rapportering till Vinnova. Den dagliga verksamheten har letts av Jörg Wohner, Volvo Personvagnar (Industriell projektledare) och Johan S. Carlson, FCC (Akademisk projektledare). Volvo Personvagnar tog över projektledningen då SAAB gick i konkurs. General Motors anslöt till projektet genom ett samarbetsavtal och har bidragit med kunskap och finansiell support som har utökat omfattningen av projektet.

Name	Role	Organisation	E-mail and Phone
Jörg Wohner	Projektledare, Industriell partner	Volvo PV	jorg.wohner@volvocars.com +46-31-3257760
Christer Bodén	Industriell partner	Scania CV	christer.boden@scania.com +46-8-55381646
Henrik Kloo	Industriell partner	AB Volvo	henrik.kloo@volvo.com +46-31-3227099
Robert Tilow	Industriell partner	General Motors	robert.tilow@gm.com
Henrik Söröd	Forskarpartner	Swerea IVF	henrik.sorod@swerea.se +46-31-3226932
Johan S. Carlson	Forskningsledare	Fraunhofer-Chalmers Center	johan.carlson@fcc.chalmers.se +46-31-7724289



VOLVO



SCANIA



swerea|IVF

