



LUNDS
UNIVERSITET

Identifiering och kalibrering för fysikaliska system

Metoder från systemidentifiering och maskininläring

Fredrik Bagge Carlson

Institutionen för Reglerteknik

Populärvetenskaplig sammanfattning av doktorsavhandlingen *Machine Learning and System Identification for Estimation in Physical Systems*, december 2018. Avhandlingen kan laddas ner från: <http://www.control.lth.se/publications>

Modellering och identifiering av modeller har alltid varit viktiga verktyg för en ingenjör. En modell underlättar resonemang kring det modellerade objektet genom att abstrahera bort egenskaper som inte är relevanta för uppgiften. I vårt fall är objektet för modelleringen ofta ett system som rör på sig, som en robot, eller en sensor, som en våg eller kamera. Valet av modell kan vara svårt—modellen bör vara så enkel som möjligt, men den måste förklara alla relevanta egenskaper hos systemet. I denna avhandling undersöker vi modeller och metoder som ligger i gränslandet mellan klassisk systemidentifiering och det nya fältet maskininläring, där man är intresserad av att få en maskin eller dator att lära sig från data. Forskning inom dessa två fält har historiskt skett med begränsad kommunikation, trots ett stort överlapp i intresse, mål och metodik. Vi hoppas kunna lyfta fram några av likheterna mellan fälten och ta fram nya metoder inspirerade av styrkorna hos metoder utvecklade däri.

Vi bygger modeller av system genom att observera data genererade av det aktuella systemet—systemidentifiering. Exempel på system vi modellerar i avhandlingen är industrirobotar, deras motorer och sensorer. Dessa modeller kan hjälpa oss förstå hur systemet fungerar och hur vi ska manipulera styrbara variabler för att få systemet att bete sig som vi vill. De styrbara variablerna i en robot, exempelvis, är strömmarna genom robotens motorer.

Maskininläring erbjuder komplexa modeller som har möjlighet att förklara många olika system. Några exempel på maskininläring är att automatiskt lära



En robot som vill lära sig något nytt, ett exempel på ett system vi vill modellera. Mätsignaler från robotens motorer kan användas för att förstå hur hårt roboten trycker på sin omgivning eller hur tunga föremål den lyfter. Dessa mätsignaler är brusiga och modeller av detta brus är viktiga för att kunna skilja brus från information. På robotens händer sitter kraftsensorer som måste kalibreras för att roboten ska förstå sensorernas signaler.

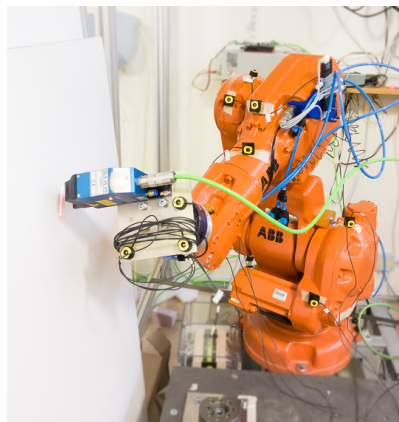
sig säga vad som finns i ett foto, översätta texter mellan olika språk, och översätta en ljudsignal med talat språk till text. Dessa modeller kan vara svåra att använda i situationer där mängden data tillgänglig för att identifiera modellen är begränsad. Det finns då för lite information för att kunna skilja olika modeller åt. Ofta har vi, vid sidan om data, tidigare kunskap om systemet vi modellerar. Fysikens lagar är ett bra exempel på regler vi vet att alla system följer. Data, tillsammans med tidigare kunskap, hjälper oss att skilja olika modeller åt och välja den som både stämmer med observerad data och den tidigare kunskapen om systemet. Hur man använder och specificerar tillgänglig kunskap om ett system, tillsammans med en modern, datadriven modell, är ett genomgående tema i avhandlingen.

Ansatsen till modellidentifiering i avhandlingen utgår från optimering, varvid vi specificerar en funktion som talar om hur bra en viss modell stämmer överens med den observerade datan, och löser ett optimeringsproblem för att hitta den bästa modellen. En bra modell låter oss, exempelvis, på ett liknande sätt lösa ett optimeringsproblem för att resonera kring hur systemet skall styras på bästa sätt. Avhandlingen detaljerar, för en rad olika problem inom bl.a. robotik, både lämpliga val av modellstrukturen och optimeringsalgoritmen som hittar den bästa kandidatmodellen med den givna strukturen.

Den presenterade forskningen erbjuder i ett par fall direkta lösningar på praktiska problem inom robotik och systemidentifiering. I andra fall erbjuds fördjupad insikt och förståelse kring fundamentala problem och egenskaper hos algoritmerna som kan vägleda konstruktion av mer komplexa modeller och algoritmer. Exempel på problem vi diskuterar inkluderar

Kalibrering av laser- och kraftsensorer

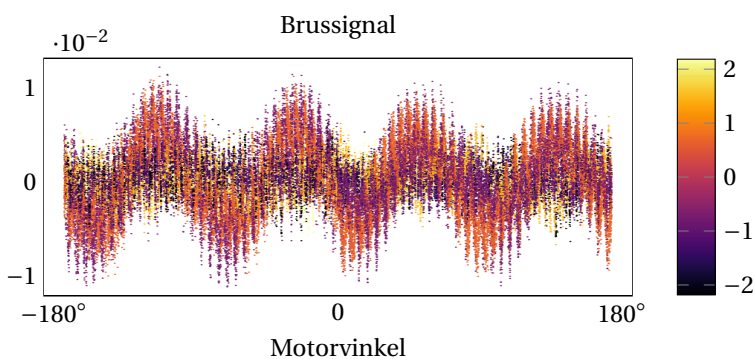
Robotar och liknande system utrustas ofta med sensorer för att, likt en människa, kunna känna och se sin omgivning. För att roboten ska förstå signalerna från sensorerna måste signalerna översättas från sensorns koordinatsystem till robotens—sensorerna måste *kalibreras*. I avhandlingen utvecklar vi metoder som låter robotar kalibrera syn- och känselsensorer, utan att använda sig av speciell utrustning. Dessa metoder underlättar användningen av extra sensorer.



En robot med en lasersensor som låter roboten se, exempelvis, en svetslampa. Sensorn måste kalibreras för att roboten ska förstå dess signaler, ett problem som adresseras i avhandlingen.

met som får det att utföra en önskad uppgift. Identifiering av dynamikmodeller är ett problem som erbjuder många utmaningar. I avhandlingen undersöker vi hur dessa modeller beter sig i situationer när mängden data är liten i förhållande till flexibiliteten hos den valda modellen, en situation man tidigare ofta försökt undvika genom att använda modeller med väldigt begränsad kapacitet.

Identifiering av frekvensdomänmodeller med insignaler Till skillnad från en tidbaserad modell, talar en modell i frekvensdomänen om vilka frekvenser som finns i en signal—signalens *spektrum*. Frekvensdomänmodeller är viktiga inom bl.a. akustik, astronomi och reglerteknik, och identifieras vanligen med en matematisk teknik kallad Fouriertransform. I avhandlingen utvecklar vi en metod som låter oss analysera signaler vars spektrum beror på en insignal, till exempel, hur störningar och brus i strömmen i en elektrisk motor beror på motorns hastighet. Metoden låter oss analysera system under generella förhållanden och samtidigt förstå sambandet mellan insignalen och spektrumet.



Brus i mätsignalen i en elektrisk motor beror på motorns rotationshastighet (färgskalan indikerar rotationshastighet). I avhandlingen utvecklar vi en metod som låter oss analysera brussignalens spektrum och hur detta varierar med motorns hastighet.

Identifiering av friktionsmodeller Alla mekaniska system innehåller friktion mellan komponenter som glider eller rullar mot varandra. Modeller av friktion är viktiga för att kunna styra systemen noggrant. I avhandlingen undersöker vi hur friktionen i lederna på en robot beror på ledens vinkel, samt hur friktionen ändras när leden blir varm. Med hjälp av mätningar från robotens motorer kan vi skatta hur hårt roboten arbetar. De utvecklade modellerna kan användas till att förbättra noggrannheten hos dessa skattningar och i vissa fall göra oss oberoende av externa och dyra kraftsensorer.