

# INTELIGENTNÍ SNÍMAČE

Petr Beneš

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky  
Kolejní 4, 612 00 Brno, [benesp@feec.vutbr.cz](mailto:benesp@feec.vutbr.cz)

## Abstrakt:

*Príspevek se věnuje problematice inteligentních snímačů. Uvádí používanou terminologii a vysvětluje pojem inteligentní snímač. Podrobněji se věnuje požadavkům kladeným na inteligentní snímače a rozebírá možnosti, jak daným požadavkům vyhovět. Jsou uvedeny typické příklady metod linearizace, kalibrace, autodiagnostiky, metody zvyšování spolehlivosti měřených dat, způsoby komunikace s nadřazeným systémem a pozornost je rovněž věnována aktuálnímu stavu standardizace v oblasti inteligentních snímačů.*

## 1. Úvod

V dnešní době je možné se setkat s termínem „inteligentní“ v mnoha různých souvislostech. V prodeji jsou „inteligentní“ pračky, ledničky, telefony, auta, materiály a samozřejmě i snímače. Jedná se však spíše o obchodní trik než o skutečnou „inteligenci“ jak jí rozumí lidé pracující v oblasti vývoje zařízení s umělou inteligencí. Obávám se, že klasickým Turingovým testem (zařízení reaguje na podněty lidského partnera takovým způsobem, že člověk není schopen rozeznat, že se jedná o stroj) by žádné z uvedených zařízení neprošlo. Je proto na místě definovat, co se obvykle pod pojmy inteligentní snímač či Smart senzor rozumí.

Vzájemný vztah a význam pojmů jako čidlo, snímač, senzor, převodník, detektor, inteligentní snímač či jejich originálních anglických verzí je zejména ve firemní literatuře a na internetu značně nejednotný. V recenzovaných a knižních publikacích se ale v poslední době ustálilo následující názvosloví:

- Čidlo (Transducer) – citlivá část snímače, převádí sledovanou fyzikální veličinu na jinou, nejčastěji elektrickou fyzikální veličinu
- Snímač (Sensor), v české literatuře též označován jako senzor, převodník, detektor – nejobecnější pojem, funkční prvek tvořící vstupní část měřicího řetězce, obvykle v kompaktním provedení, výstupem je obvykle unifikovaný elektrický signál
- Polovodičový snímač (Semiconductor Sensor) – snímač využívající k převodu sledované veličiny fyzikální jevy v polovodiči
- MEMS – mikroeletromechanický systém, nejčastěji vyrobený povrchovým nebo objemovým mikroobráběním, snímače i akční členy
- Smart sensor – obvykle polovodičové nebo MEMS snímače, které mají současně na stejném substrátu integrovány základní elektronické obvody pro zpracování signálu

- Inteligentní snímač (Intelligent sensor) – snímač doplněný o základní prvky „intelligence“, viz. dále uvedená definice a požadavky

Pojem inteligentní snímač definovali jako první v roce 1978 Beckenbridge a Husson následujícím způsobem:

*Inteligentní snímač obsahuje funkce pro zpracování měřených dat, automatickou korekci měřených dat, dokáže automaticky detekovat a eliminovat abnormální a nesprávné hodnoty. Obsahuje také sadu algoritmů, které umožňují reagovat na změnu vnějších podmínek.*

Dnes patří mezi základní požadavky kladené na inteligentní snímače zejména programovatelné zesílení, linearizace, filtrace a normalizace měřeného signálu, možnost automatické korekce vlivu parazitních veličin, pokročilé metody potlačení šumu a verifikace platnosti naměřených dat, autokalibrace a autodiagnostika, statistické funkce, hlídání mezí a v neposlední řadě možnost přímého zapojení snímače do distribuovaných systémů pomocí vhodné digitální komunikační sběrnice.

V následujících kapitolách budou uvedeny základní způsoby, jak obyčejné snímače doplnit o prvky „intelligence“ ve smyslu předchozí kapitoly. V praxi se obvykle jedná o polovodičové snímače, ale samozřejmě existují i „klasické“ velké snímače, které lze v duchu předchozích definic považovat za inteligentní. V dalším textu se proto podíváme podrobněji na jednotlivé požadavky kladené na inteligentní snímače a možnosti, jak daným požadavkům vyhovět.

## **2. Úprava signálu, linearizace a kalibrace**

Základní úprava signálu je spojena se vstupní částí snímače, kde dochází ke konverzi měřené fyzikální, chemické nebo biologické veličiny na elektrickou. Už z principu funkce samotného čidla tak dochází hned na vstupu k obecně nelineární filtraci vstupního signálu. Navazující elektronika má pak za úkol především signál normalizovat, tj. vhodně zesílit, korigovat případnou nelinearitu čidla a omezit měřený frekvenční rozsah s ohledem na parametry zdroje signálu.

Potlačení chyb měřicího kanálu vznikajících při výrobě snímačů v důsledku rozptylu výrobních tolerancí se dosahuje kalibrací snímače. U inteligentních snímačů se se upouští od klasických metod kalibrace přímo ve výrobním procesu (např. laserové nastavování rezistorů u snímače tlaku) a využívá se některé z dále uvedených digitálních metod. Mezi hlavní chyby měřicího kanálu, které se kalibrací potlačují, patří offset, chyba zesílení, nelinearita, příčná citlivost, hystereze a drift.

K nejobtížnějším patří kompenzace driftu, tzn. kompenzace dlouhodobých pomalých změn základní převodní charakteristiky snímače. Využívá se především metod autokalibrace, příp. numerické korekce na základě predikce pomocí matematického modelu snímače, ale i tak se nevyhneme (jednou za několik let) rekalibraci snímače v akreditované laboratoři.

## **3. Základní metody linearizace**

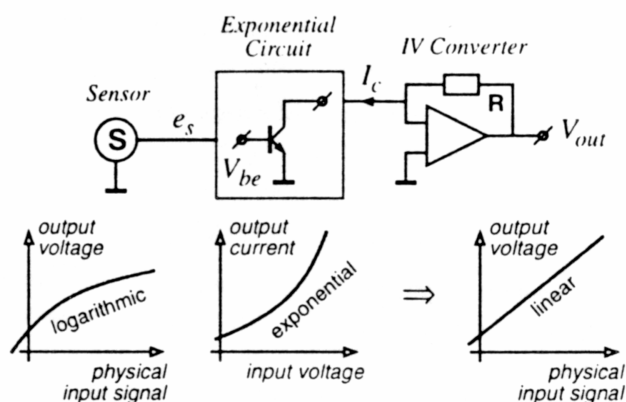
Některé typy snímačů vykazují nelineární charakteristiku, která přímo plyne z principu jejich funkce. Převodní charakteristika je velmi dobře definovaná a opakovatelná, jsou to např.

termočlánky, odporové snímače teploty, průtokoměry založené na škrťících členech apod. Chybu linearity těchto snímačů je možné považovat za systematickou a lze poměrně snadno odstranit, obvykle současně s provedením kalibrace snímače.

Nelinearity mající náhodný charakter a projevující se u každého konkrétního snímače odlišně již je nutné linearizovat některou z obecnějších metod interpolačních nebo aproximačních.

### 3.1. Analogová linearizace

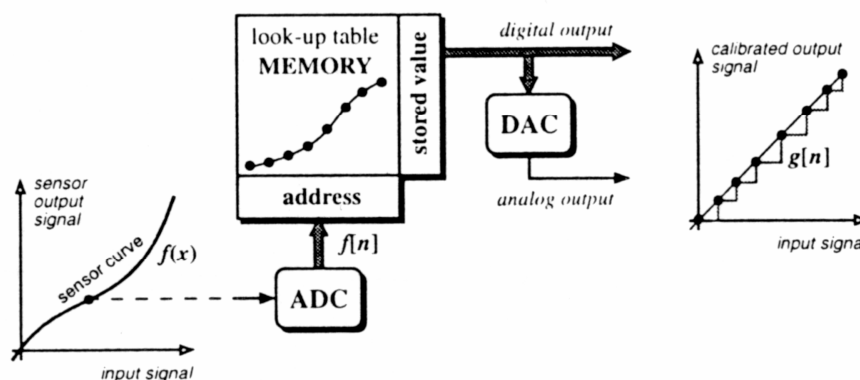
Jedná se o jednu z nejstarších metod, která je vhodná pouze k odstranění systematických chyb. Základní princip je zřejmý z obr. 1, kdy nelineární výstup ze snímače je přiveden na vstup jednotky s přesně inverzní charakteristikou. Nevýhodou je problematická dlouhodobá stabilita parametrů korekčního obvodu a jeho teplotní závislost, naopak výhodou jsou dobré dynamické parametry (mezní kmitočet, zpoždění).



Obr. 1 Příklad analogové linearizace snímače

### 3.2. Linearizace založená na korekční tabulce

Princip linearizace je velmi jednoduchý, kompletní inverzní charakteristika snímače je uložena v paměti mikroprocesoru. Digitální výstup AD převodníku představuje přímo adresu paměťového místa s korigovanou digitální hodnotou (viz. obr. 2).

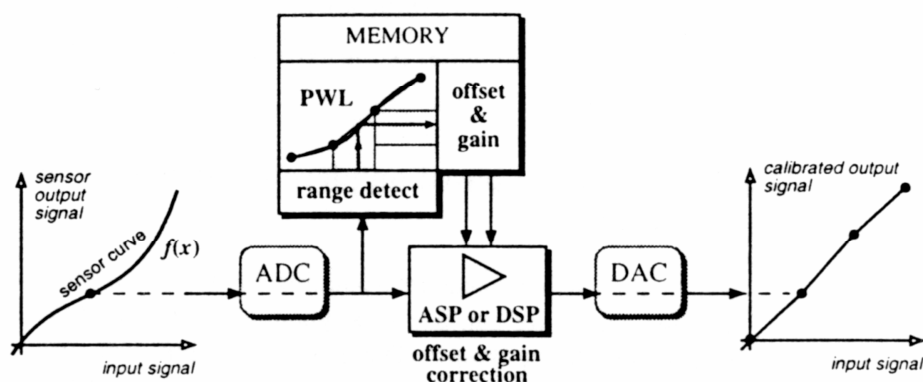


Obr. 2. Linearizace pomocí tabulky

K hlavním nevýhodám patří vysoké nároky na paměť a problémy při vytváření korekční tabulky vyplývající z nutnosti realizace pomalé a přesné změny vstupního neelektrického signálu. Výhodou je vysoká rychlost, jednoduchá implementace a možnost linearizace současně s kalibrací snímače.

### ***3.3. Linearizace založená na úsekové lineární interpolaci a interpolaci polynomem nebo splinem***

Základem je rozdělení charakteristiky na úseky, kde krajní body úseků odpovídají kalibrovaným bodům. Jednotlivé úseky jsou pak interpolovány přímkou, příp. kalibrované body proloženy po částech polynomem nebo splinem a příslušné koeficienty jsou uloženy v paměti. Pro každou měřenou hodnotu je pak vypočítán odpovídající korigovaný výstup. Výhodou jsou ve srovnání s tabulkovou metodou menší nároky na paměť pro uchování potřebných konstant, omezený počet kalibračních bodů a relativně jednoduchý algoritmus korekčního mechanismu. Nevýhodou lineární interpolace je omezená přesnost linearizace, pro velmi nelineární průběhy je potřebný velký počet úseků a derivace výstupního signálu obsahuje diskontinuity. Interpolace polynomem většinu nevýhod odstraňuje za cenu významného zvýšení výpočetních nároků.



Obr. 3. Linearizace pomocí lineární interpolace

### ***3.4. Linearizace založená na aproximaci křivky***

Tento typ je digitální verzí analogového principu, je obzvláště vhodný pro potlačení systematických chyb. Výhodou je malý potřebný počet kalibračních bodů přenosové charakteristiky, nízké paměťové nároky na uchování koeficientů a jeden výpočetní vztah pro celý rozsah snímače. Nevýhodou jsou vysoké nároky na výpočetní výkon, kdy se již prakticky neobejdeme bez výpočtů v plovoucí řádové čárce.

### ***3.5. Linearizace založená na minimalizaci chyb***

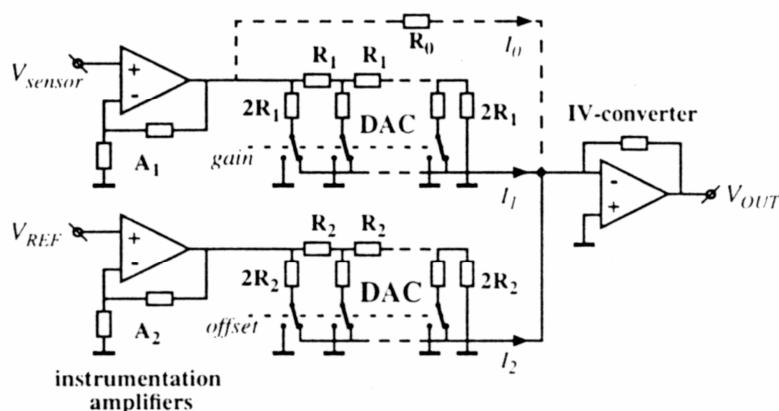
Tento způsob linearizace je využíván, pokud máme předběžnou představu o tvaru přenosové charakteristiky a současně máme k dispozici i dostatečný počet kalibračních bodů. Obvykle je používána metoda nejmenších čtverců a je minimalizována chybová funkce.

## 4. Základní metody kalibrace

Základní metody kalibrace je možno rozdělit podle místa implementace na kalibraci v analogové části, kalibraci při převodu na digitální signál a kalibraci v digitální části měřicího řetězce.

### 4.1. Kalibrace využívající úpravu analogového signálu

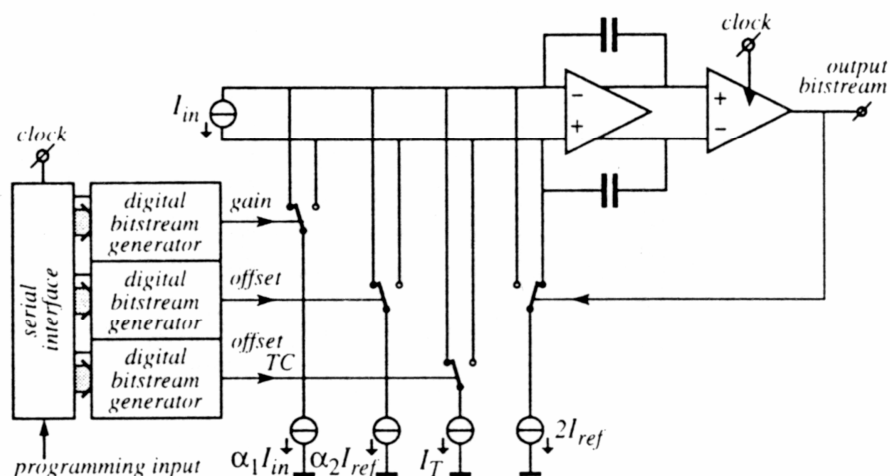
Prakticky všechny snímače obsahují analogové obvody sloužící k úpravě signálu z čidla. Obvykle zde najdeme zesilovače, filtry, kompenzační obvody apod. Nejjednodušším způsobem kalibrace je potom změna zesílení a offsetu pomocí proměnných elementů (laserem trimované rezistory, digitálně řízené rezistory, spínané kapacity...). V inteligentních snímačích jsou pak nejčastěji používány zesilovače s programovatelným zesílením a digitálně analogové převodníky pro korekci offsetu, zesílení a jejich teplotních závislostí. Konkrétní řešení využívá kalibraci s DA převodníkem řízeným pomocí signálu PWM, nebo s násobícím DA převodníkem (viz. Obr. 4). Další možností je využití proudových digitálně řízených děličů nebo programovatelných analogových polí. Hlavní výhodou analogových kalibračních metod je velká dosažitelná šířka pásma, nevýhodou pak dosažitelná přesnost odpovídající max. osmi až deseti bitům.



Obr. 4. Kalibrace využívající násobící DA převodník

### 4.2. Kalibrace využívající vlastností sigma-delta AD převodníků

Základní princip je velmi podobný principu, kdy je DA převodník buzen PWM signálem. I v případě kalibrace využívající vlastností sigma-delta AD převodníků je k měřenému signálu „přidáván“ pomocný signál se střední hodnotou rovnou požadované korekci. Ukázka typického systému s programovatelným offsetem, zesílením a korekcí teplotních koeficientů je na obr. 5.



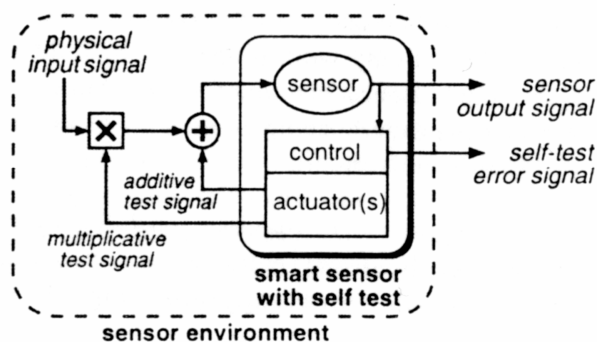
Obr. 5. Obvod kalibrace využívající vlastnosti sigma-delta převodníku

### 4.3. Kalibrace využívající digitální zpracování signálu

Tento nejmodernější způsob kalibrace je založen na kalibraci polynomem s postupně narůstajícím řádem. Hlavní výhodou je vysoká univerzálnost a snadná implementace i pro multidimenzionální závislosti zachycující např. vliv příčné citlivosti snímače nebo vliv parazitních veličin, nevýhodou pak vysoká výpočetní náročnost.

## 5. Autodiagnostika

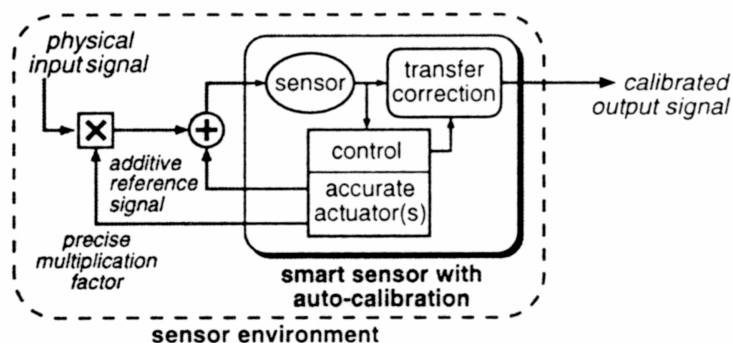
Vnitřní blokové schéma možného řešení obvodu autokalibrace snímače je na obr. 6. Instalace jednoho nebo i několika akčních členů v bezprostřední blízkosti snímače umožňuje ovlivňovat vstupní neelektrický signál měřený čidlem testovaného snímače. Vnitřní řídicí elektronika pak ovládá aktuátor a současně sleduje, zda dochází k ovlivňování výstupního signálu z čidla. V případě, že není detekován chybový signál vyvolaný aktuátorem, řídicí elektronika situaci vyhodnotí jako chybový stav. Hlavním rozdílem proti kalibraci je, že k autodiagnostice dochází během běžného provozu a nikoli v definovaných laboratorních podmínkách.



Obr. 6. Blokové schéma obvodu autodiagnostiky

## 6. Autokalibrace

Obvodové řešení autokalibrace (viz. obr.7) je velmi podobné jako v případě autodiagnostiky, základním rozdílem je využití přesného aktuátoru a dále bloku umožňujícího provádět korekci převodní charakteristiky snímače. Pro autokalibraci je nezbytné, aby použitý akční člen měl minimálně o řád lepší parametry než kalibrovaný snímač. To je obecně vzato poměrně obtížně splnitelný požadavek. Jednodušší a samozřejmě i méně dokonalé řešení spočívá v kalibraci pouze elektronické části měřicího kanálu známým elektrickým signálem simulujícím výstup z čidla snímače.



Obr. 7 Blokové schéma obvodu autokalibrace

Příkladem plnohodnotného obvodu s autokalibrací jsou např. snímače magnetického pole, kde je čidlo snímače (Hallova sonda, magnetorezistor) obklopeno budící cívku napájenou ze zdroje referenčního proudu. Díky pevně dané vzájemné poloze čidla a cívky lze dosáhnout vysoké přesnosti a stability generovaného referenčního magnetického pole.

Autokalibrace ale obvykle není schopna nahradit základní kalibraci snímače s vazbou na příslušný metrologický normál, je využívána spíše pro monitorování parametrů snímače a automatickou korekci offsetu a zesílení.

## 7. Spolehlivost měřených dat, matematické a statistické funkce

Zvýšení věrohodnosti a spolehlivosti měřených dat může být dosaženo paralelním zapojením více totožných snímačů nebo ještě lépe více funkčně rozdílných snímačů měřících stejnou vstupní fyzikální veličinu. Případné rozdíly měřených hodnot pak indikují chybnou funkci snímače. Většina inteligentních snímačů průběžně monitoruje měřenou veličinu a počítá základní statistické parametry, sleduje trendy a indikuje neočekávané změny trendu, které mohou souviset s poškozením snímače nebo poruchou v technologii. Objevují se i pokusy využít pro analýzu chybových stavů metod umělé inteligence.

## 8. Komunikace

Jednou z nejdůležitějších vlastností inteligentních snímačů je schopnost oboustranné komunikace s nadřazeným systémem. Současně to ale představuje i jeden z největších problémů při reálném nasazení inteligentních snímačů, protože v praxi se používá velké množství nejrozumnějších průmyslových sběrnic. Pro výrobce inteligentních snímačů je tak

obtížné pokrýt kompletní portfolio sběrnic a zaměřují se tak především na nejrozšířenější a nejpoužívanější standardy. V automobilovém průmyslu jsou to zejména J-1850, J-1939 (CAN) a FlexRay, v oblasti orientované na výrobní technologie a technologické linky pak především Foundation Fieldbus, Profibus PA, CAN, DeviceNet, SDS a pro oblast automatizace budov protokoly BACnet, LonTalk, Modbus případně některý z moderních bezdrátových protokolů řady IEEE 802.15. x (např. ZigBee). Některé z uvedených protokolů jsou již dostupné „v křemíku“, tzn., jsou implementovány do specializovaných mikroprocesorů a tím významně usnadňují a urychlují vývoj nových zařízení. Tato situace je typická pro automobilový průmysl, kde je kritická spolehlivost a nízká cena.

## ***9. Standardizace inteligentních snímačů***

Standardy skupiny IEEE 1451 zahrnují popis modelu inteligentního snímače schopného pracovat v síti, a to od popisu hardwarového rozhraní, až po koncepci snímače jako takového a jeho napojení na vyšší úroveň řízení. Dále je podrobně uveden objektový model zařízení, popisující jeho chování, atributy a typy datové komunikace. Základní myšlenkou je umožnit snadnou integraci do nadřazené sítě libovolnému typu snímače s rozhraním odpovídajícím některému dílčímu standardu prostřednictvím vhodného univerzálního hardware. Cílem je vytvořit obecně přijatelný a podporovaný standard, který z hlediska výrobců snímačů a akčních členů přinese zjednodušení vývoje nových typů sjednocením používaných rozhraní a z hlediska uživatele výhody spojené s integrovaným katalogovým listem, kompatibilitou typů, možnostmi „Plug’n’Play“ apod. Podrobněji viz. [5], [6].

## ***10. Závěr***

Inteligentní snímače představují významnou skupinu snímačů, se kterými se v průmyslové praxi můžeme setkat. Mezi typické představitele patří například optické snímače pro kontrolu kvality obrábění využívající ke své činnosti světlo odražené od sledovaného povrchu, snímače lokalizující polohu aktivní vady v zatěžované konstrukci metodou akustické emise, komplexní snímače umístěné v ruce manipulátorů, snímače chemických látek, tzv. laboratoře na čipu, snímače magnetického pole pro lokalizaci defektů, monitory kvality vzduchu, atd. Největší nárůst produkce lze v budoucnu očekávat v oblasti chemických a biochemických snímačů.

## ***11. Literatura***

- [1] ĎAĎO, S.; KREIDL, M. Senzory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996, 316 str., ISBN 80-01-01500-9
- [2] HORN, G.; HUIJSING, J. Integrated Smart Sensors – Design and Calibration. Kluwer Academic Publishers, 1998, 202 str., ISBN 0-7923-8004-5
- [3] FRANK, R. Understanding Smart Sensors. Artech House Publishers, 2000, 390 str., ISBN 0-89006-311-7
- [4] HUIJSING, J.; MEIJER, G. Smart Sensor Interfaces. Kluwer Academic Publishers, 1997, 135 str., ISBN 0-7923-8024-X
- [5] BENEŠ, P., BEYER, T. Standard IEEE 1451 – budoucnost inteligentních snímačů? Automa . 2004. 10(7). p. 7 - 10. ISSN 1210-9592.
- [6] IEEE 1451 Homepage, <http://ieee1451.nist.gov>