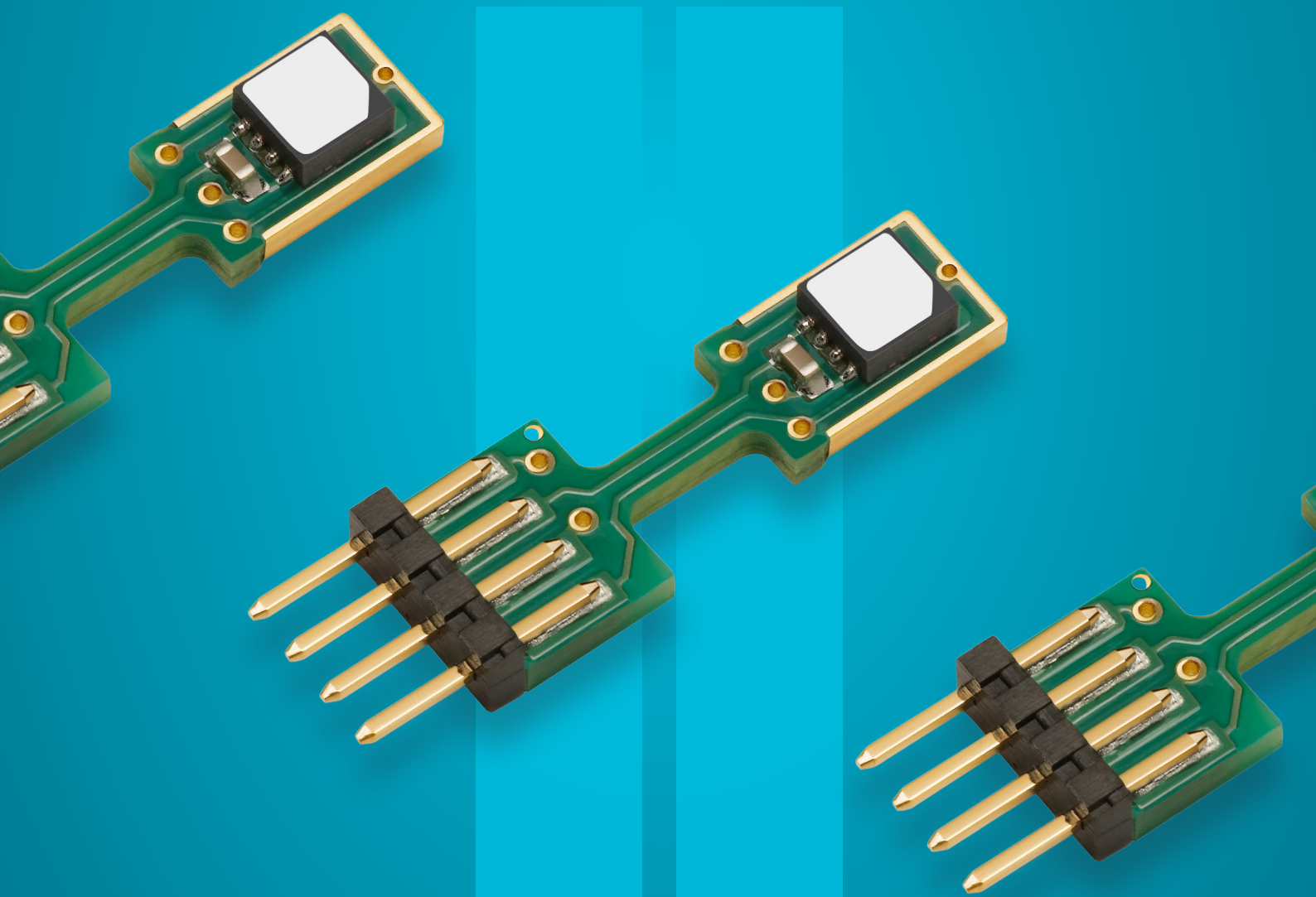


PRZEMYSŁOWY IOT

TECHNOLOGIA CZUJNIKÓW 4.0
DZIAŁANIE, KOMUNIKACJA I ZASTOSOWANIE

ARTYKUŁ TECHNICZNY

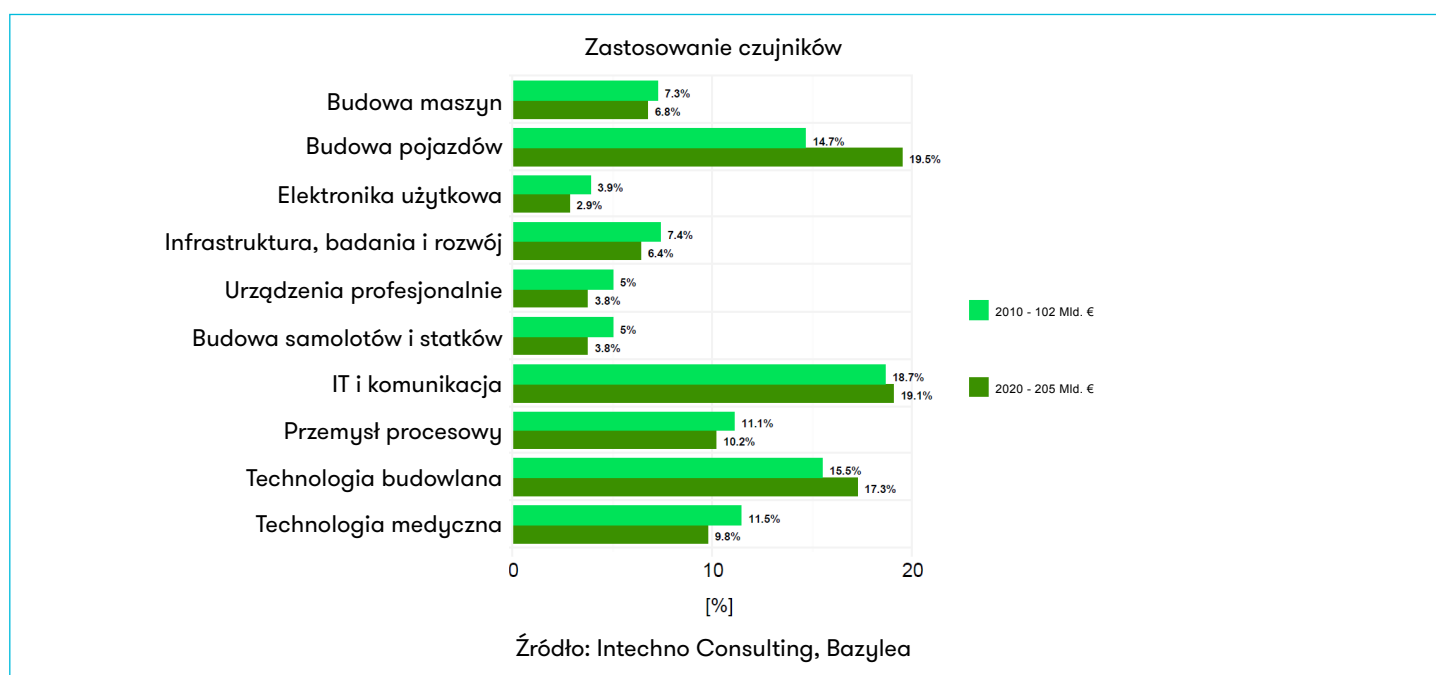


Technologia czujników 4.0 - działanie, komunikacja i zastosowanie

Technologia czujników stała się kluczowa we wszystkich obszarach życia i gospodarki. Ważnym elementem czwartej rewolucji przemysłowej jest IIoT (Przemysłowy Internet Rzeczy), a główną rolę odgrywają w nim czujniki i odpowiednie techniki komunikacyjne, które umożliwiają również zastosowania wykraczające poza czystą produkcję. Rdzeniem IIoT jest digitalizacja sygnałów czujników i znormalizowany „transport” surowych lub wstępnie przetworzonych danych do miejsca, w którym są one potrzebne. Ważne obszary zastosowania czujników to nadal przemysł samochodowy, medyczny, automatyka budynkowa i segment konsumencki. W sektorze motoryzacyjnym to przede wszystkim systemy wspomagające kierowcę spowodowały dalszy rozwój czujników radarowych, ultradźwiękowych, lidarowych i wideo. Dlatego też niniejszy artykuł koncentruje się na zagadnieniu komunikacji czujników w obszarze IIoT i zastosowaniu czujników w motoryzacji.

Czujniki oferowane są dla ponad 100 rodzajów pomiarów. Przewiduje się, że wielkość rynku globalnego w 2020 r. wyniesie około 200 mld USD (rys. 1). W procesie tym czujniki coraz częściej rozwijają się do postaci niezależnych mikrosystemów, składających się z czujników i elektroniki do przetwarzania danych i komunikacji. Systemy te są połączone w sieć, samowystarczalne i inteligentne.

Jednym z największych wyzwań dla IIoT jest spójna, znormalizowana komunikacja między czujnikiem lub elementem wykonawczym a chmurą. W dalszej części artykułu zaprezentujemy ważne w tym obszarze technologie takie jak IO-Link i Ethernet jednoparowy. Następnie przyjrzymy się jednemu z najbardziej efektywnych zastosowań technologii czujników, czyli konserwacji predykcyjnej.



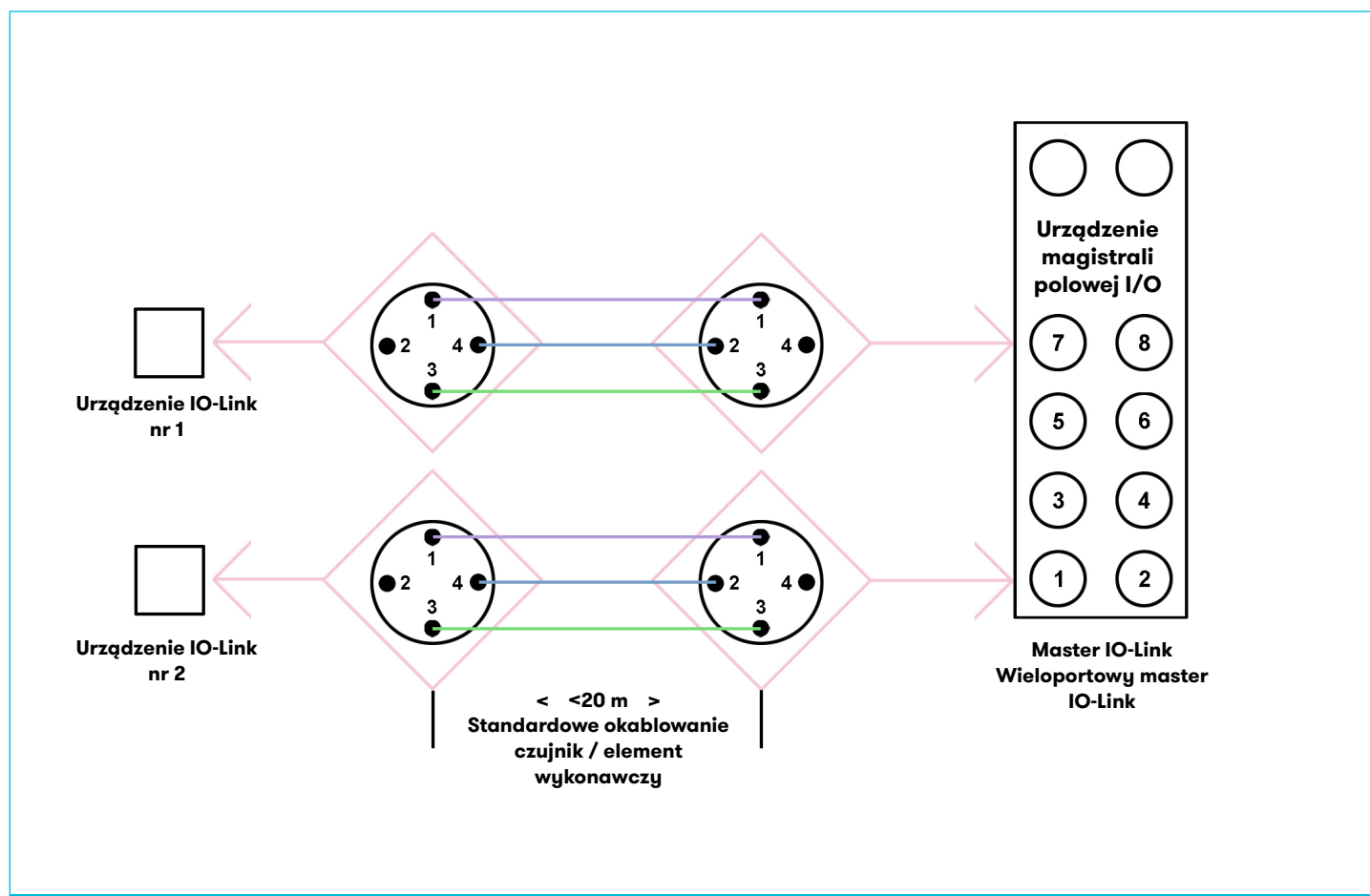
Rys. 1. Przewiduje się, że wielkość rynku międzynarodowego w 2020 r. wyniesie około 205 mld USD (źródło: Intecho Consulting, Bazylea)

IO-Link: otwarty, kompatybilny wstecznie interfejs czujnika / elementu wykonawczego

IO-Link to połączenie komunikacyjne od punktu do punktu (IEC 61131-9) ze znormalizowanymi złączami, kablami i protokołami oprogramowania. System został zaprojektowany w taki sposób, że pracuje w ramach przemysłowej infrastruktury czujnika 3-przewodowego i elementu wykonawczego oraz składa się z komponentów „IO-Link Master” i „IO-Link Device” (rys. 2).

IO-Link odnotował największy roczny wzrost (40%) w 2019 r., osiągając taką samą dynamikę jak w roku poprzednim. Obecnie całkowita liczba zainstalowanych urządzeń IO-Link w skali globalnej wynosi ponad 16 mln.

Połączenie od punktu do punktu pomiędzy masterem IO-Link (Multi-Port-Controller lub Gateway) i urządzeniami IO-Link (czujnik lub element wykonawczy) wykorzystuje złącze standardowe (zwykle M12) oraz 3- lub 4-przewodowy kabel o długości do 20 metrów (rysunek 2). Master może być wyposażony w wiele portów (zwykle cztery lub osiem). Każdy port mastera łączy się z jednym urządzeniem IO-Link – może pracować albo w trybie SIO albo z komunikacją dwukierunkową.



Rys. 2. Połączenie master IO-Link / urządzenie. (Rysunek: channel-e)

Dwa tryby komunikacyjne w ofercie

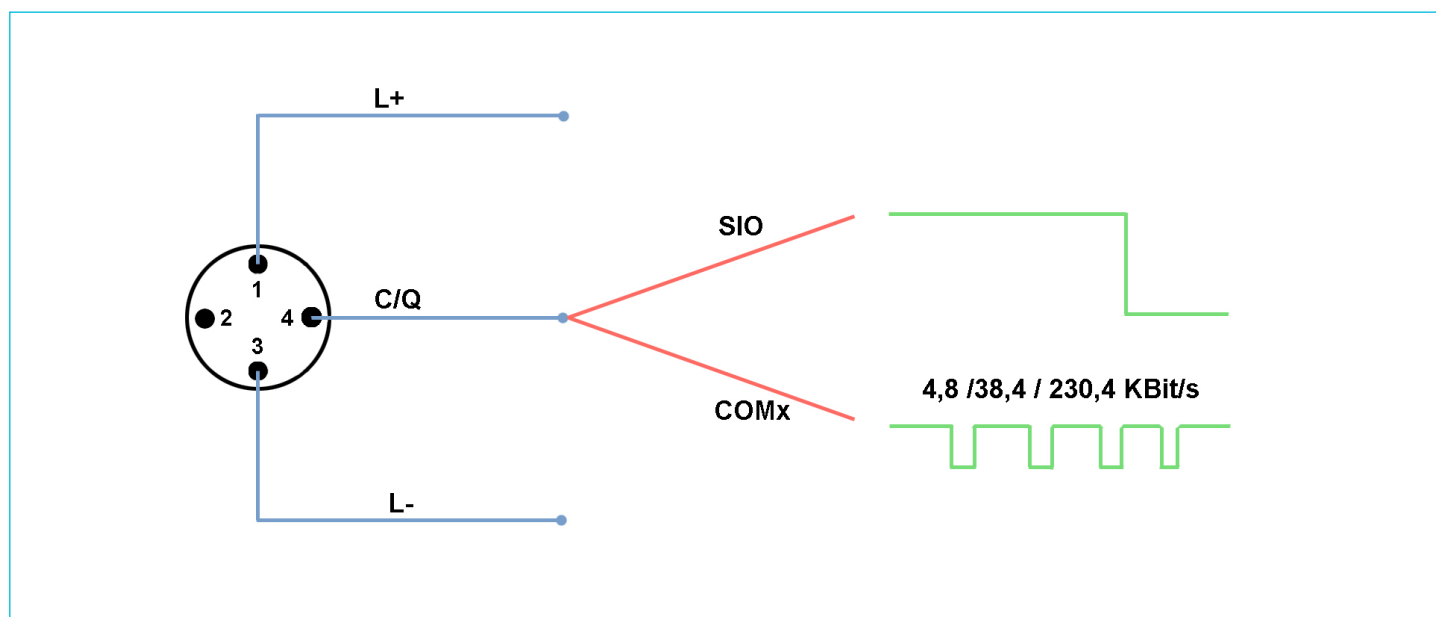
IO-Link jest standardem dla interfejsów komunikacyjnych typu single-drop (SDCI, single-drop digital communication interface for small sensors and actuators), który został znormalizowany jako IEC-61131-9, przy czym zapewniono kompatybilność wsteczną z czujnikami binarnymi zgodnie z IEC 60974-5-2 (rys. 3 i tab. 1). Czujniki IO-Link mają cechy czujników binarnych, dodano jednak komunikację dwukierunkową. Master IO-Link można łączyć z obydwoma wariantami czujników binarnych i IO-Link, dzięki czemu możliwe jest proste dodanie IO-Link do istniejącego systemu.

Standard IO-Link stanowi, że komunikacja musi odbywać się na przewodzie o długości 20 metrów za pomocą nieekranowanego kabla ze standardowymi wtyczkami przemysłowymi. Najczęściej stosuje się złącza M8 i M12. Komunikacja odbywa się od punktu do punktu i wymaga 3-przewodowego interfejsu (L+, C/Q i L-). Komunikacja pomiędzy urządzeniami master i slave jest realizowana z trzema prędkościami transmisji: COM1 4800 Baud, COM2 38,4 kBaud, COM3 230,4 kBaud.

Zakres napięcia zasilania w systemie IO-Link wynosi od 20 V do 30 V dla elementu master i 18 V do 30 V dla urządzenia (czujnika lub elementu wykonawczego).

Urządzenie IO-Link musi funkcjonować w ciągu 300 ms po przekroczeniu 18 V przez L+. Obydwa tryby komunikacyjne są standardowymi trybami E/A (SIO) i SDCI (Single-Drop Communication Interface). W trybie SIO zapewniona jest kompatybilność wsteczna z istniejącymi czujnikami w polu, które stosują 0 V lub 24 V do sygnalizacji wejścia/wyjścia dla mastera IO-Link. W trybie IO-Link komunikacja z jedną z trzech prędkości transmisji danych jest dwukierunkowa. Urządzenie IO-Link obsługuje tylko jedną prędkość transmisji danych, a master IO-Link musi obsługiwać wszystkie trzy prędkości transmisji danych. Komunikacja przebiega za pomocą impulsów 24 V przy użyciu NRZ (nonreturn-to-zero) na przewodzie C/Q, z logicznym 0 między CQ i L-24 V i logicznym 10 V między CQ i L-.

W trybie IO-Link może znajdować się pin 2 w trybie DI jako wejście cyfrowe lub w trybie DO jako wyjście cyfrowe lub nie jest podłączony (NC).



Rys. 3. Definicje pinu IO-Link. (Rysunek: channel-e)

Pin	Sygnal	Nazwa	Standard
1	L+	24 V	IEC 61131-2
2	I/Q	Niepodłączone, DI lub DO	IEC 61131-2
3	L-	0 V	IEC 61131-2
4	Q	Sygnal przełączający (SIO)	IEC 61131-2
	C	Przełączanie kodowane (COM1, COM2, COM3)	IEC 61131-9

Tabela 1. Definicje pinu IO-Link

Najważniejsze informacje – IODD w IO-Link

Wszystkie urządzenia IO-Link (czujniki lub elementy wykonawcze) muszą zapewniać plik opisu urządzenia IO-Link (IODD). Jest on stosowany przez mastera IO-Link do identyfikacji, interpretacji danych i konfiguracji.

Plik IODD zawiera:

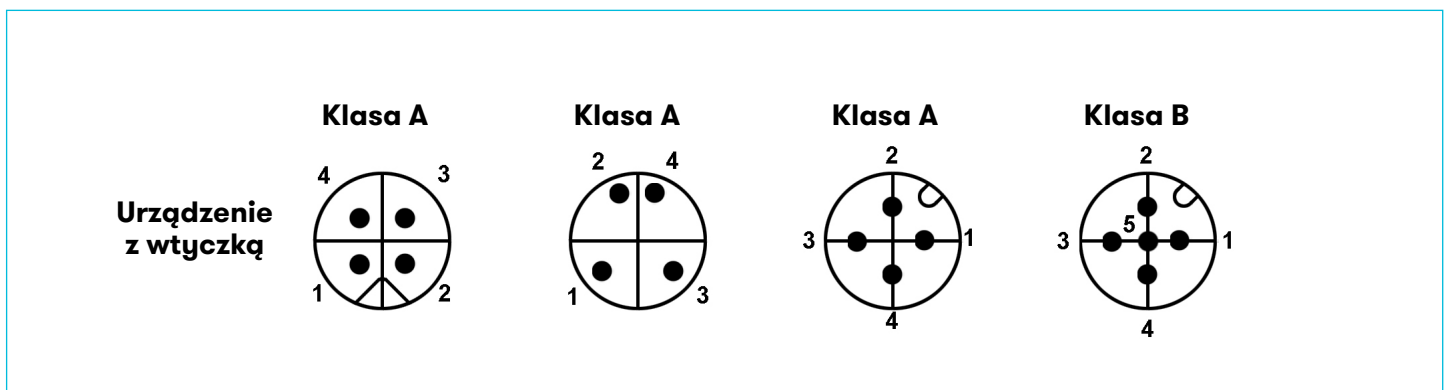
- wszystkie ważne informacje w celu przywrócenia komunikacji,
- parametry urządzenia,
- informacje identyfikacyjne,
- informacje procesowe i diagnostyczne,
- zdjęcie urządzenia i logo producenta.

Pliki IODD są plikami XML, których struktura jest opisana w oddzielnym rozdziale standardu IEC 61131-9.

Konsorcjum IO-Link utrzymuje centralną bazę danych dostawców z plikami IODD na swoim serwerze internetowym (www.io-link.com).

Złącza

Znormalizowane złącza i kable są używane zgodnie z definicją w IEC 61131-9. Złącza portów klasy A mają 4-przewodowe połączenia (maksymalnie) do obsługi 3-przewodowego systemu połączeń (L+, L-, C/Q) z czwartym połączeniem, które może być używane jako dodatkowy przewód sygnałowy (DI lub DO). Złącza portów klasy B mają 5-przewodowe połączenia dla urządzeń wymagających dodatkowego zasilania (rys. 4).

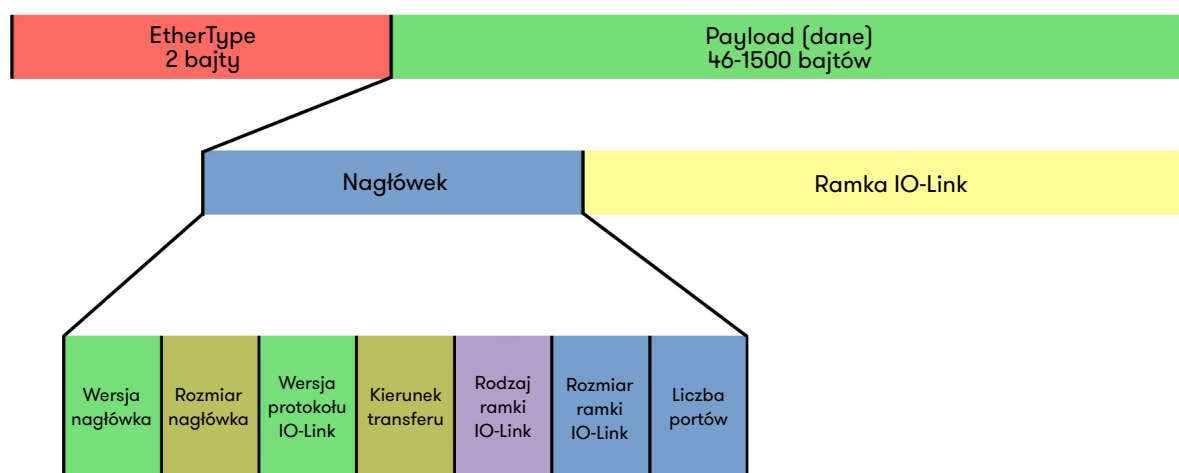


Rys. 4. Złącze IO-Link. Wersja M12 są oznaczone kodem A. (Rysunek: channel-e)

Dostosowanie IO-Link do Ethernetu jednoparowego

IO-Link został opracowany jako przemysłowy interfejs komunikacyjny dla urządzeń polowych, czujników i elementów wykonawczych. Interfejs oferuje trzy różne prędkości transmisji i kable o maksymalnej długości 20 m. Ogólnie rzecz biorąc, prosta integracja z systemami automatyki, jak również wysoki stopień standaryzacji typowych funkcji oraz opis urządzenia końcowego to dwie główne zalety tej technologii komunikacyjnej.

W case study: „Extension of IO-Link for Single Pair Ethernet transmission”, zaproponowano wprowadzenie EtherType dla I/O-Link. EtherTypes istnieją już np. dla ProfiNet lub EtherCat. Chodzi tutaj o pole w ramce Ethernet, które jest stosowane do wyświetlania używanego protokołu w „obciążeniu użytkowym” ramki. Według badania proces ten można zrealizować przy bardzo niewielkich nakładach związanych ze sprzętem i oprogramowaniem.



Rys. 5. Definicje pinu IO-Link. (Rysunek: channel-e)

Ethernet jednoparowy jako najważniejszy trend

Ethernet jednoparowy (SPE, Single Pair Ethernet) jest uważany za jeden z najważniejszych trendów w przemysłowej transmisji danych oraz za „katalizator” IIoT i Przemysłu 4.0. Ta technologia może urzeczywistnić „Przemysłowy Internet Rzeczy”. Każdy czujnik lub element wykonawczy jest dostępny za pośrednictwem protokołu internetowego i może przesyłać dane do lub z chmury bez żadnych przeszkód.

Poziom sterowania i pola w technice automatyzacji charakteryzuje się wysoce rozdrobnioną infrastrukturą sieci magistrali polowych. Powstające w ten sposób wyspy danych wymagają skomplikowanych bramek Gateway, które utrudniają dostęp do danych z urządzeń w polu. Wyeliminowanie tych bramek Gateway mogłoby znacznie zmniejszyć koszty i złożoność tych instalacji oraz usunąć tworzone przez nie wyspy danych (tab. 2).

Magistrala polowa	Prędkość transmisji danych	Długość kabla
Profibus DP	od 9,6 kb/s do 12 Mb/s	od 100 m do 1200 m
Profibus PA	31,25 kb/s	1900 m
CANopen	od 62,5 kb/s do 1 Mb/s	od 30 m do 1000 m
DeviceNet	od 125 kb/s do 500 kb/s	od 100 m do 500 m
AS-Interface	167 kb/s	100 m
CC-Link	10 Mb/s	100 m
IO-Link	230 kb/s	20 m

Tabela 2. Popularne technologie magistrali polowych (źródło: Belden)

Jednym ze sposobów wyeliminowania tej fragmentacji jest kontynuacja sieci Ethernet od poziomego sterowania do poziomego pola. Jednak realizację tej metody utrudnia ograniczenie długości kabli do maksymalnie 100 m, zastosowanie minimalnie dwóch par przewodów oraz mniej użytecznych złączy.

Prędkości transmisji i długości kabli w standardzie

Ethernet jednoparowy umożliwia przesyłanie danych z prędkością 10 Mbps, 100 Mbps i 1 Gbps przez dwużyłowy kabel miedziany i jednoczesne zasilanie urządzeń końcowych przez linię Power over Data Line (PoDL).

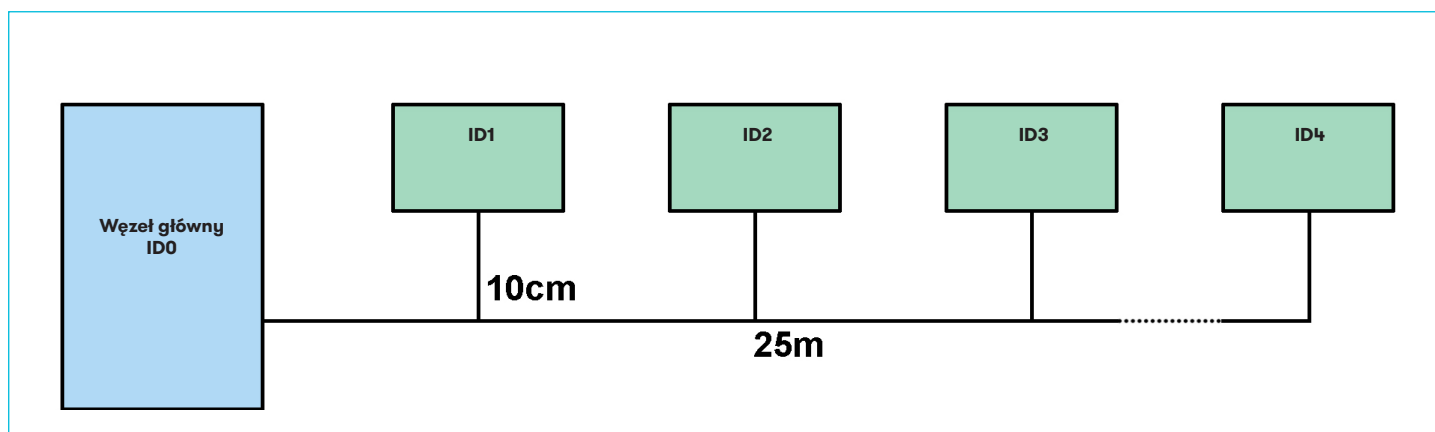
Prędkości transmisji i długości kabli są następujące:

- 10 MB/s (dupleks) do 1000 m, transmisja o szerokości pasma 20 MHz (10Base-T1L)
- 10 MB/s (półdupleks) do 40 m, transmisja o szerokości pasma 20 MHz (10Base-T1S)
- 100 MB/s (dupleks) do 15 m, transmisja o szerokości pasma 66 MHz (100Base-T1)
- 1000 MB/s (dupleks) do 40 m, transmisja o szerokości pasma 600 MHz (1000Base-T1)

10Base-T1L jest wersją „dalekiego zasięgu” Ethernetu jednoparowego znormalizowanego w IEEE 802.3cg dla kabla o długości 1000 m. 10Base-T1L pracuje w trybie pełnego duplexu, co oznacza, że sygnały nadawcze i odbiorcze są przesyłane jednocześnie przez parę przewodów. W celu kompensacji echa stacja może usunąć własny sygnał transmisji z całego sygnału i odizolować odebrany sygnał. 10Base-T1L wykorzystuje skrętki dwużyłowe o szerokości pasma 20 MHz i impedancji charakterystycznej 100 Ω.

Ethernet APL (Advanced Physical Layer) zapewnia dodatkowe środki ostrożności w zastosowaniach w przemyśle przetwórczym. Opiera się na 10BASE-T1L zgodnie z IEEE 802.3cg. Konstrukcja może składać się z kabla typu Trunk (wiązki kabli) o długości maksymalnie 1000 m między przełącznikami polowymi w obszarach niebezpiecznych strefy 1 oraz maksymalnie 200 m między przełącznikiem polowym a urządzeniem polowym w strefie 0. Ethernet APL zawiera rozszerzenia, które są specjalnie dostosowane do wymagań przemysłu procesowego, takie jak iskrobezpieczeństwo (IEC TS 60079-47) i profile portów dla opcjonalnego zasilania urządzeń polowych.

10Base-T1S jest wersją „krótkiego zasięgu” Ethernetu jednoparowego znormalizowanego w IEEE 802.3cg 10BaseT1S funkcjonuje w trybie półduplexu i może być obsługiwany w technologii od punktu do punktu oraz wielopunktowej (rys. 6). Ta ostatnia jest definiowana za pomocą magistrali o długości 25 m z rozgałęzieniami o długości 10 cm. W tej topologii przełącznik jest zbędny, ponieważ stosowany jest schemat arbitrażu PLCA (Physical Layer Collision Avoidance), który zapewnia brak kolizji danych. Ten standard przewiduje co najmniej osiem rozgałęzień, ale może być ich znacznie więcej.



Rys. 6. 10Base-T1S funkcjonuje w trybie półduplexu i jest obsługiwany w technologii wielopunktowej, która definiuje długość magistralę o długości 25 m z rozgałęzieniami o długości 10 cm. (Rysunek: channel-e)

10Base-T1S jest topologią dla zastosowań motoryzacyjnych, przemysłowych i związanych z automatyką budynków służącą do integracji wielu uczestników sieci na niewielkiej przestrzeni. Działa bez przełączników, a do implementacji wymaga jedynie małych mikrokontrolerów oraz stosunkowo nieskomplikowanych PHY.

Struktura sieci 10Base-T1S jest bardzo prosta: wszyscy uczestnicy znajdują się w sieci przy czym jeden z uczestników, który jest również uczestnikiem komunikacji w magistrali, jest definiowany jako węzeł główny z ID 0, a wszyscy pozostali uczestnicy mogą być kolejno numerowani. Zadaniem węzła głównego jest zapobieganie kolizji danych na magistrali, czyli organizowanie arbitrażu PLCA. W tym celu wysyła tak zwany „beacon” i od tego momentu „odliczany jest czas”. Zwykle na 25 μ s otwiera się okno czasowe (można je jednak dowolnie ustawić) dla pierwszego uczestnika (węzła głównego). W tym oknie węzeł może zacząć „nadawać” (transmit opportunity). Po upływie tego czasu następnemu uczestnik dostaje swoje 25 μ s aż do ostatniego węzła.

Następnie wszystko zaczyna się od początku, węzeł główny wysyła beacon i okna czasowe przechodzą od węzła 0 aż do węzła N. Jeśli uczestnik w ciągu 25 μ s skorzysta ze swojego prawa do wysyłania, może umieścić ramkę Ethernet na magistrali. Ponieważ uczestnicy magistrali mają różne „potrzeby komunikacyjne”, nie można określić stałego czasu cyklu dla takiej sieci wielopunktowej. Zwłaszcza, że cykl może ulec dalszej zmianie w czasie z powodu reguł wyjątków. W ten sposób uczestnikowi magistrali z wolnym MCU może zostać przyznane prawo wysłania sygnału bezczynności, który pozwala wydłużyć okno czasowe (tutaj 25 μ s). Szczególnie ważnym węzłom może zostać przyznane prawo umieszczenia więcej niż jednej ramki na magistrali.

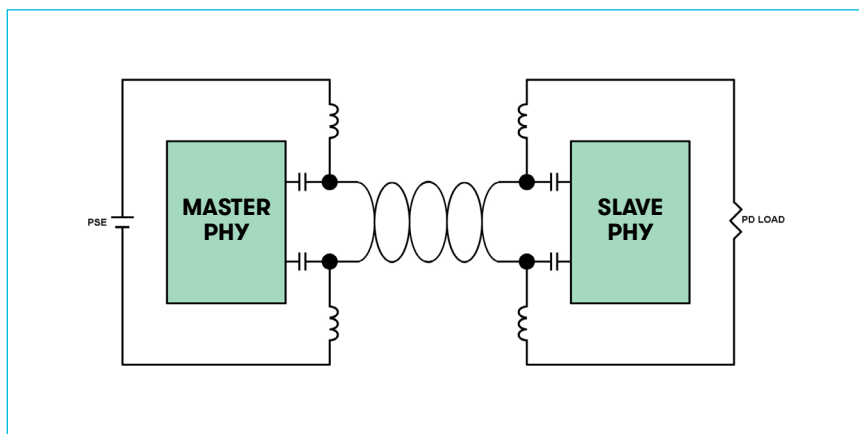
100Base-T1 opiera się na standardzie IEEE 802.3bw. Jest to wersja Ethernetu jednoparowego dla kabli o długości 40 m oraz szybkości transmisji 100 MBit/s. 100Base-T1 funkcjonuje jako pełen duplex i wykorzystuje skrętki dwużyłowe o szerokości pasma 66 MHz i impedancji charakterystycznej 100 Ω .

1000Base-T1 opiera się na IEEE 802.3bp. Jest to wersja Ethernetu jednoparowego dla kabli o długości od 15 m do 40 m (w zależności od ekranowania) i przenosi dane z prędkością 1 GBit/s. 1000Base-T1 funkcjonuje jako pełen duplex i wykorzystuje skrętki dwużyłowe o szerokości pasma 600 MHz i impedancji charakterystycznej 100 Ω .

MultiGigBase-T1, które powinno być ustalone w standardzie 802.3ch, znajduje się jeszcze w fazie standaryzacji. Powinno zezwalać na Ethernet jednoparowy o prędkości 2,5; 5 i 10 Gbit/s oraz możliwe do pokonania odległości do 15 m.

PoDL – Dane i prąd w jednym przewodzie

Jedną z głównych możliwości Ethernetu jednoparowego jest jednoczesna transmisja danych i zasilania za pomocą jednej pary przewodów: Power over Dataline (PoDL, linia zasilania przez łącza danych). Standard IEEE 802.3bu stanowi: „Warstwa fizyczna i parametry zarządzania dla linii zasilania przez łącza danych (PoDL) pojedynczej zbalansowanej skrętki sieci Ethernet” definiuje zdalne zasilanie przez jednoparowe kanały Ethernet w taki sam sposób, jak Power over Ethernet (PoE) (rys. 7).



Rys. 7. Jednoczesne przesyłanie danych i zasilania przez jedną parę przewodów. (Rysunek: channel-e)

Cele i specyfikacje działania PoDL to między innymi:

- Zezwalanie na działanie zasilanego urządzenia, nawet jeśli nie są dostępne żadne dane.
- Obsługa poziomów napięcia i prądu dla branży motoryzacyjnej, transportowej i automatyki.
- Obsługa operacji szybkiego uruchamiania z określonymi konfiguracjami napięcia/prądu oraz opcjonalna praca z konfiguracją napięcia/prądu w czasie pracy.

Energia elektryczna może być przesyłana przez PoDL w 10 klasach napięcia/prądu o mocy od 0,5 W do 50 W (moc odbiornika, moc oddawana = 63,3 W). Maksymalna wartość prądu to 1,6 A (tab. 3). Trwają prace nad poszerzeniem o 5 dodatkowych klas (tab. 4).

Dla tego rodzaju zasilania wymagane są przewody dwużyłowe z kablami zgodnie z IEC 61156. Kable STP kategorii 7 są nieodpowiednie do tego zastosowania.

Klasa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Napięcie [V]	5,5-18	5,5-18	14-18	14-18	12-36	12-36	26-36	26-36	48-60	48-60
Natężenie prądu [A]	0,1	0,22	0,25	0,47	0,1	0,34	0,21	0,46	0,73	1,3
Moc PD [W]	0,5	1	3	5	1	3	5	10	30	50

Tabela 3. Klasy PoDL (PD= Powered Device)

Klasa	10	11	12	13	14	15
Napięcie [V]	20-30	20-30	20-30	50-58	50-58	50-58
Natężenie prądu [A]	0,092	0,240	0,632	0,231	0,6	1,579
Moc PD [W]	1,32	3,2	8,4	7,7	20	52

Tabela 4. Dodatkowe klasy PoDL (PD= Powered Device)

PoDL oferuje zarówno niezawodne funkcje ochrony i wykrywania błędów do identyfikacji urządzeń, jak i bezpośrednią komunikację z urządzeniami w celu zagwarantowania bezbłędnego i bezpiecznego zasilania.

Do ustalenia potrzebnej klasy zasilania stosowany jest dodatkowy protokół komunikacyjny: SCCP (Serial Communication Classification Protocol). Za pomocą tego protokołu PSD (Power Sourcing Equipment) i PD (Powered Device) negocjują zapotrzebowania na zasilanie dla PD. PSD wykrywa obecność odbiornika, sprawdzając podpis pod kątem obecności diody Zenera 3 V na wejściu PD.

Maksymalna moc zasilania zdalnego dla standardu PoE IEEE 802.3bt wynosi 100 W dla urządzeń NEC klasy 2. Prawdopodobnie dla przyszłych rozszerzeń PoDL wartość ta również pozostanie poniżej 100 W, a dla napięcia zasilania 24 V używanego w automatyce przemysłowej obowiązuje zaokrąglony maksymalny prąd szczytowy 4 A.

Perspektywy na przyszłość: konserwacja predykcyjna



Rys. 8: Wdrożenie monitoringu stanu, np. dla systemu hydraulicznego wymaga przede wszystkim bardziej rozbudowanego połączenia czujników i komponentów. (Rysunek: Urządzenia analogowe)

Przemysł 4.0 jako trend w dziedzinie produkcji przemysłowej oznacza zmianę paradygmatu, której celem jest przede wszystkim optymalne wykorzystanie zasobów produkcyjnych. W celu samodzielnego wdrożenia tych procesów organizacyjnych należy jasno określić nie tylko wymogi zewnętrzne, np. co należy robić, kiedy i jak często, ale również dostępność zasobów produkcyjnych i procesów. W związku z tym trzeba wiedzieć wcześniej – najlepiej z kilkumiesięcznym wyprzedzeniem – jakie prace konserwacyjne są wymagane w maszynie lub procesie, aby móc niezawodnie zaplanować ich dostępność.

Jednak możliwe są także inne opcje: jeśli maszyna nie jest już w optymalnym stanie, np. obrabiarka nie ma najwyższej precyzji, nadal można zaplanować jej zastosowanie do innych prac, jeśli osiągnięta precyzja jest wystarczająca do innych zadań. Najważniejsze jest więc monitorowanie stanu każdej maszyny lub każdego indywidualnego procesu, aby móc optymalnie i elastycznie zaplanować użytkowanie i konserwację na podstawie znajomości aktualnego stanu. Wdrożenie monitoringu stanu, np. w systemie hydraulicznym wymaga przede wszystkim bardziej rozbudowanego połączenia czujników i komponentów lub procesu podrzędnego oraz dostarczania danych zarejestrowanych w całym procesie dla wszystkich komponentów i podsystemów. Wymaga to przede wszystkim digitalizacji czujników, przy czym oprócz czystych danych pomiarowych na żądanie muszą być udostępniane metadane lub inne właściwości.

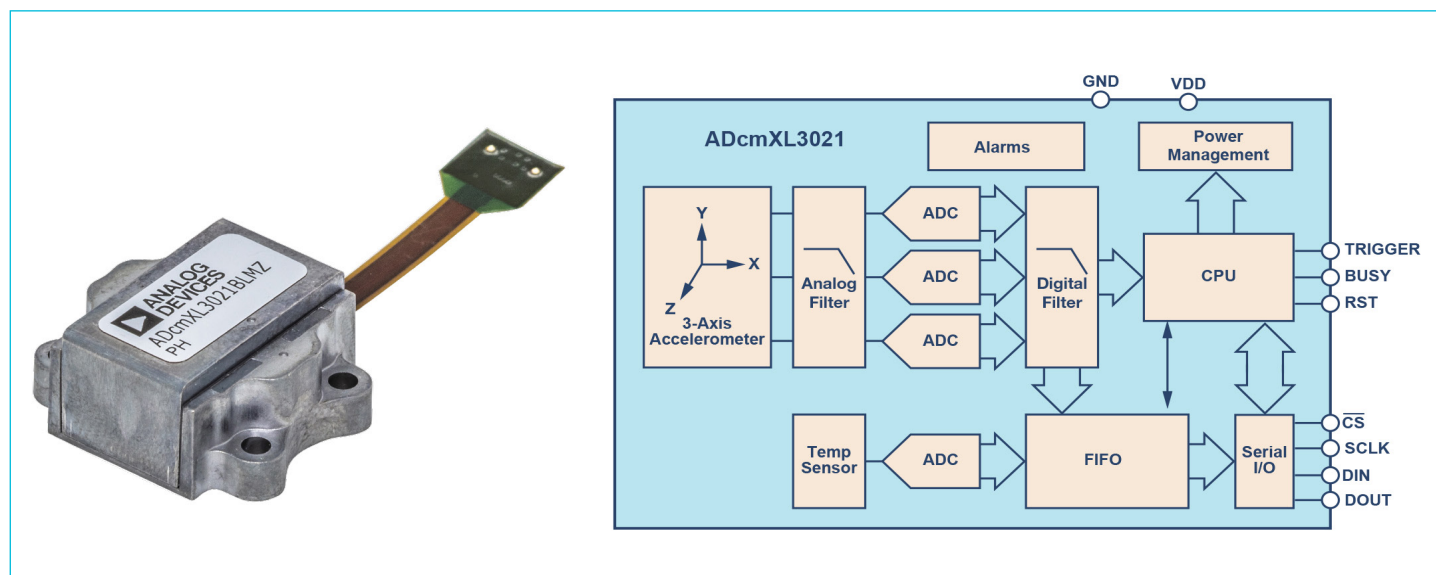
	Koszty produkcji i instalacji	Koszty operacyjne	Koszty wynikające z nieplanowanych przestołów
Konserwacja naprawcza			€€€€€€€€€€ Nieplanowane przestoje produkcyjne
Konserwacja zapobiegawcza		€€ Interwencja na miejscu zgodnie z planem/ systematyczna wymiana części ulegających zużyciu	€€€€ Ponieważ maszyny nie są monitorowane w czasie rzeczywistym, występują nieplanowane przerwy w produkcji
Konserwacja predykcyjna	€€ Instalacja urządzeń specjalnych (czujniki drgań itp.)	€ Znajomość stanu maszyny, monitorowanie za pomocą specjalnego oprogramowania lub AI	€ Dzięki monitorowaniu maszyny w czasie rzeczywistym przerwy w produkcji można doskonale zaplanować

Tabela 5. Dzięki konserwacji predykcyjnej można zminimalizować ogólne koszty produkcyjne.

Aby określić, kiedy należy rozpocząć proces konserwacji, wykorzystuje się parametry takie jak wibracje, hałas i temperatura. Spośród mierzalnych wielkości fizycznych najwięcej informacji o źródle problemu w maszynie wirującej (silnik, generator itp.) dostarcza pomiar widma drgań. Nieprawidłowe wibracje mogą wskazywać na wadliwe łożysko kulkowe lub brak równowagi w osi. Każdy z tych problemów przejawia się za pomocą określonego objawu, np.: źródła drgań w maszynach wirujących.

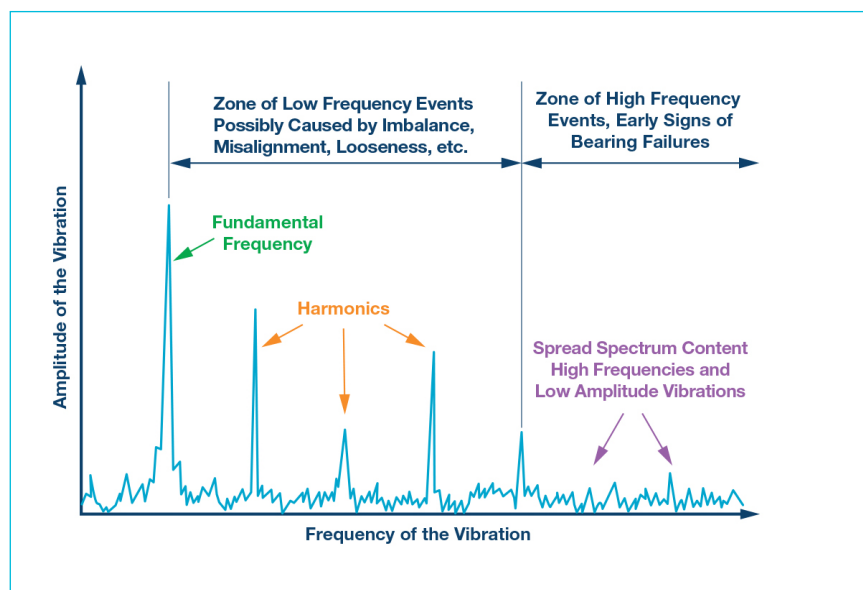
Pomiar drgań za pomocą przyspieszeniomierzy

Pomiary drgań można wykonać za pomocą przyspieszeniomierza umieszczonego w pobliżu monitorowanego elementu. Czujnik ten może być czujnikiem typu piezoelektrycznego lub – co jest bardziej korzystne – czujnikiem typu MEMS, który nie tylko zapewnia lepszą reakcję przy niskich częstotliwościach, lecz również ma niewielkie rozmiary (rys. 9).



Rys. 9. Moduł ADcmXL3021 oferuje wymagania technologii czujników dla konserwacji predykcyjnej (rys.: Urządzenia analogowe)

W przypadku wadliwego łożyska kulkowego za każdym razem, gdy kulka zetknie się z pęknięciem lub uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego lub zewnętrznego, następuje uderzenie powodujące drgania lub niewielkie przesunięcie osi obrotu. Częstotliwość tych wstrząsów zależy od liczby obrotów oraz od liczby i średnicy kulek.



Rys. 10. Sygnatura widmowa zależy od rodzaju problemu. Pierwsze oznaki awarii łożyska można rozpoznać po wysokich częstotliwościach. (Rysunek: Urządzenia analogowe)

Ale to nie wszystko. W momencie wystąpienia usterki wspomniane wstrząsy generują czasami słyszalny hałas – falę uderzeniową – który przejawia się w postaci składowych widmowych o niskim poziomie i stosunkowo wysokich częstotliwościach, często większych niż 5 kHz i zawsze znacznie powyżej podstawowej częstotliwości obrotowej.

W miarę pogłębiania się usterki poziom składowych o niskiej częstotliwości wzrasta. Na zaawansowanym etapie poziom drgań można wykryć za pomocą podstawowego przyspieszeniomierza. Jednak w tym momencie awaria jest nieuchronna, a zespół konserwacyjny ma niewiele czasu na reakcję. Aby uniknąć nieprzyjemnej niespodzianki, ważne jest, aby rozpoznać pierwsze oznaki usterki za pomocą cichego przyspieszeniomierza o dużej przepustowości.

Źródła drgań w maszynach wirujących

Do problemów, które często występują w maszynie wirującej, należy awaria łożyska kulkowego. Analiza widmowa danych z przyspieszeniomierza w pobliżu łożyska pokazuje szereg charakterystyk, amplitud i częstotliwości, które zależą od prędkości i przyczyny usterki.

Do charakterystycznych częstotliwości systemu należą:

$$f_{cage} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\phi) \right) \times f_{axle}$$

Częstotliwość w stosunku do wady pierścienia zewnętrznego (stała):

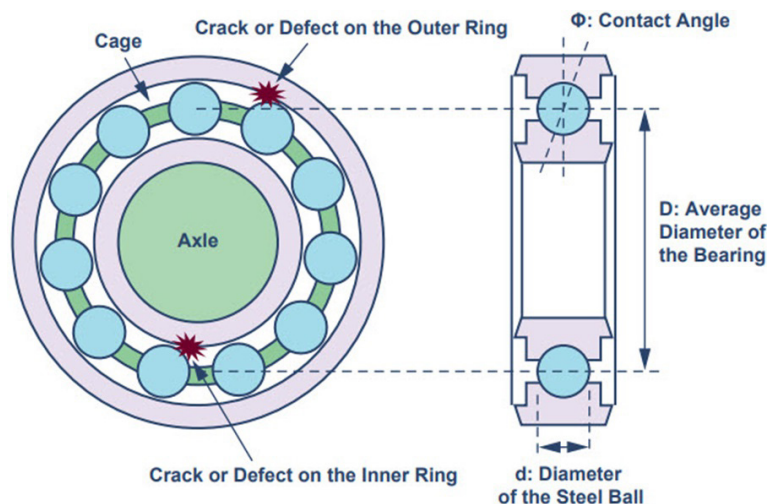
$$f_{ext} = N \times f_{cage}$$

Częstotliwość w stosunku do wady pierścienia wewnętrznego (oś)

$$f_{int} = N \times (f_{axle} - f_{cage})$$

Oprócz tych właściwości częstotliwości, fala uderzeniowa generowana przez kulkę toczącą się nad ubytkiem (pęknięcie, łuszczenie itp.) powoduje drgania o wysokiej częstotliwości (> 5 kHz), które czasami mogą być słyszalne.

1. N: liczba kulek
2. Φ : kąt działania
3. f_{axle} : częstotliwość obrotowa osi
4. d: średnica kulki
5. D: przeciętna średnica łożyska



Rys. 11: Usterka łożyska kulkowego (rys.: Urządzenia analogowe)



Istnieje wiele technik analizy drgań. Oprócz cyfrowego filtrowania w celu przewyciężenia drgań powodowanych przez sam proces lub przez inne elementy maszyny, często można zastosować narzędzia matematyczne, takie jak te zawarte w ADcmXL3021 (obliczanie średniej, odchylenia standardowego, współczynnika szczytu, kurtozę itp.). Analizę można przeprowadzić w zakresie czasu, ale większość informacji o anomalii i jej pochodzeniu dostarcza analiza częstotliwości. Można nawet zastosować obliczenie cepstrum, które czasami jest zawarte w widmie sygnału (odwrotna transformata Fouriera, która jest stosowana do logarytmu transformaty Fouriera sygnału). Niezależnie od zastosowanej metody analizy, trudność polega na ustawieniu optymalnego progu alarmowego tak, aby proces konserwacji nie został przeprowadzony ani za wcześnie, ani za późno.

Alternatywą dla konwencjonalnej konfiguracji progów alarmowych jest wprowadzenie sztucznej inteligencji do procesu wykrywania błędów. W fazie uczenia maszynowego stosuje się zasoby chmury w celu utworzenia reprezentatywnych modeli maszyny (na podstawie danych z czujnika drgań). Po utworzeniu modeli można je pobrać na lokalny procesor. Zastosowanie wbudowanego oprogramowania umożliwi identyfikację w czasie rzeczywistym nie tylko bieżących zdarzeń, lecz również zdarzeń przejściowych, dzięki czemu można wykryć usterki.

Szybka jazda – czujniki w motoryzacji

Liczba czujników w samochodach nieustannie wzrasta, jednocześnie rośnie ich wydajność. Zużycie energii jest stale minimalizowane i coraz częściej stosuje się inteligentne funkcje przetwarzania. Dane z czujników pochodzące z różnych komponentów mogą być używane redundantnie i w połączeniu z fuzją czujników są ważnym warunkiem wstępnym dla połączenia sieciowego poza pojazdem (V2X).

W branży motoryzacyjnej czujniki wspierają m.in. segmenty takie jak: sterowanie silnikiem, kontrola emisji, funkcje podwozia i klimatyzacja, funkcje autonomicznej jazdy, funkcje wspomagające, e-mobilność, rozpoznawanie operatora (np. sterowanie gestami), bezpieczeństwo aktywne i pasywne oraz ogólne funkcje nadwozia. Czujniki rejestrują i monitorują procesy elektryczne, magnetyczne, mechaniczne, elektromagnetyczne, termiczne i chemiczne w pojazdach oraz przedstawiają informacje na wyświetlaczu lub w postaci elektronicznej w celu dalszego przetwarzania.

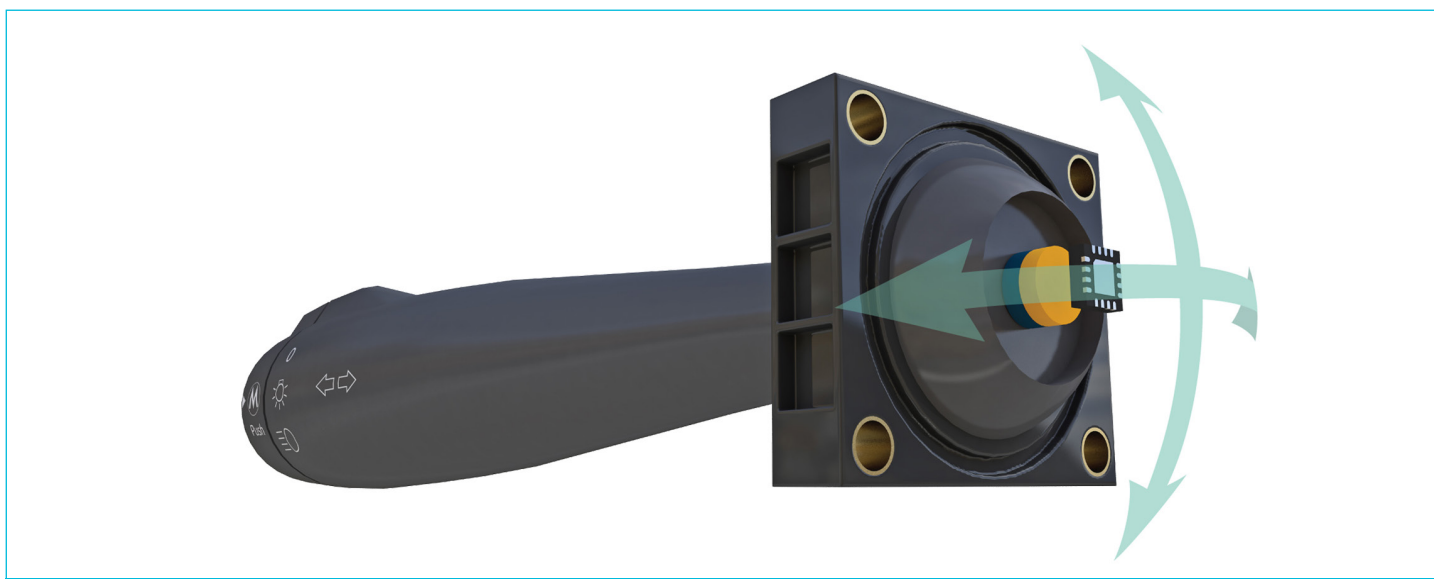
Trwają prace nad koncepcją samochodów autonomicznych (jazda autonomiczna). Oprócz infrastruktury sieciowej potrzebnych do tego procesu istotne jest także zebranie wielu danych gromadzonych w czasie rzeczywistym z czujników prędkości, przyspieszenia, pozycji i odległości. Czujniki te przesyłają dane, które są gromadzone, oceniane, łączone (fuzja czujników) i przetwarzane. Dzięki temu w najlepszym przypadku pojazd może być sterowany bez ingerencji kierowcy. W drodze do osiągnięcia tego celu czujniki już dziś działają w systemach wspomagających kierowcę i zapewniają bezpieczeństwo oraz komfort. W ten sposób wspierana jest także koncepcja konserwacji predykcyjnej.

Około 2/3 czujników stosowanych w pojazdach obsługuje układ napędowy i sterowanie silnikiem. Poza tym rejestrują one zmiany wagi, temperatury, wibracji, przepływu masowego, natężenia przepływu, momentu obrotowego, położenia zaworu i ruchu obrotowego, a następnie przekazują te dane do jednostek sterujących.

Wybrane czujniki zapewniają stabilność jazdy i bezpieczeństwo:

- czujniki ciśnienia,
- czujniki obrotów i prędkości (np. czujniki Halla),
- czujniki pozycji (czujniki kąta skrętu kierownicy),
- przyspieszoniomierze,
- czujniki temperatury,
- czujniki gazu,
- przepływomierze,
- czujniki siły,
- czujnik obrazu,
- IMU (Inertial Measurement Unit) – składające się z przyspieszoniomierzy i żyroskopów.

Przyspieszoniomierze, czujniki odchylenia i czujniki ciśnienia do sterowania silnikiem, żyroskopy, IMU i inne są dostępne m.in. jako czujniki MEMS (system mikroelektromechaniczny). Zawierają także sztuczną inteligencję i mogą np. nauczyć się gestów charakterystycznych dla danej osoby. Według firmy Bosch w obecnych samochodach może znajdować się aż 50 czujników MEMS. Będą stosowane także w nowych projektach, takich jak drony i taksówki lotnicze.



Rys. 12. Kompatybilny z samochodami czujnik 3D z efektem Halla MLX90395 (trójosiowy węzeł magnetometryczny) firmy Melexis wykorzystuje efekt Halla, aby umożliwić bezkontaktowe wykrywanie w trzech wymiarach. Wersja z podwójną matrycą zapewnia przy tym np. redundancję podczas rejestracji dźwigni zmiany biegów w pojazdach. (Rysunek: Zdjęcie prasowe Melexis)

Specjaliści ds. bezpieczeństwa odpowiedzialni za rejestrowanie danych otoczenia

Coraz więcej czujników jest stosowanych w systemach wspomagających kierowcę. Wiele typów czujników jest używanych redundantnie. Systemy częściowo lub w pełni autonomiczne muszą rozpoznawać środowisko i określać swoje położenie. W tym procesie pomagają czujniki ultradźwiękowe (wykrywają przeszkody w bliskiej odległości) i radarowe (wykrywają położenie i prędkość obiektów na większej odległości). Czujniki lidarowe dostarczają obraz 3D, a systemy kamer rejestrują kolor i kontury obiektu.

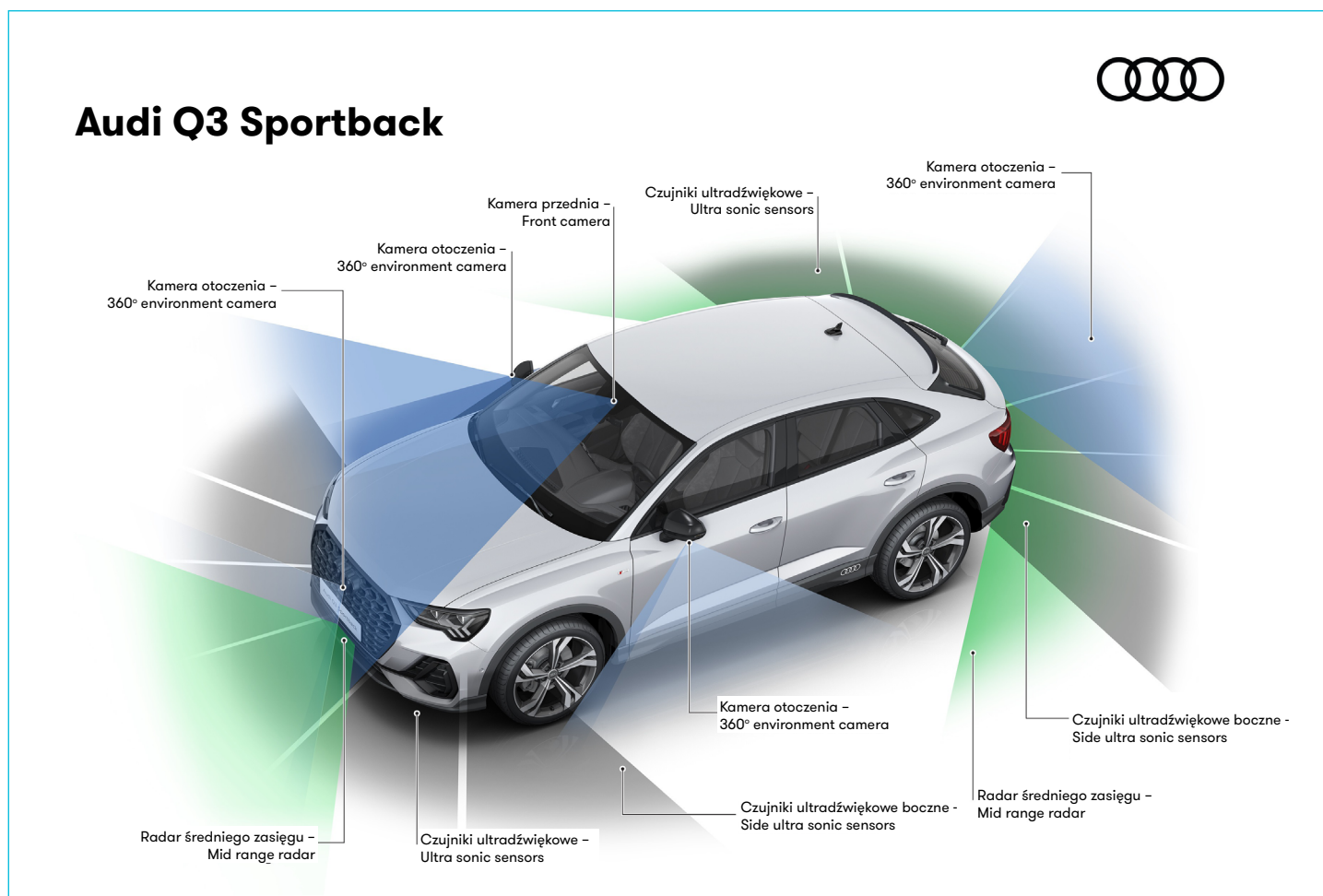
Na przykład w zależności od wariantu wyposażenia nowoczesny model Volkswagena ma do 24 czujników rozpoznawania otoczenia przeznaczonych dla systemów wspomagających kierowcę. Należą do nich czujniki radarowe i ultradźwiękowe, kamery i skanery laserowe. W trakcie dalszego rozwoju systemów wspomagających kierowcę, aż do osiągnięcia zautomatyzowanej jazdy od poziomu 3, czujników tych będzie znacznie więcej.

	Kamera	Radar	Lidar	Ultradźwięk	Radar + lidar	Kamera + lidar	Kamera + radar
Rozpoznawanie obiektów	średnio	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze
Klasyfikacja obiektów	dobrze	źle	średnio	źle	średnio	dobrze	dobrze
Pomiar odległości	średnio	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze
Dokładność krawędzi obiektów	dobrze	źle	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze
Śledzenie pasa ruchu	dobrze	źle	źle	źle	źle	dobrze	dobrze
Widoczność	średnio	dobrze	średnio	źle	dobrze	średnio	dobrze
Funkcjonowanie podczas złej pogody	źle	dobrze	średnio	dobrze	dobrze	średnio	dobrze
Funkcjonowanie w ograniczonym oświetleniu	średnio	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze	dobrze

Tabela 6. Redundantne dane czujników są szczególnie niezbędne dla autonomicznych funkcji jazdy. Połączenie różnych technologii ma wady i zalety (źródło danych: McKinseyCompany).

W przyszłości powstanie więcej hybrydowych rozwiązań czujnikowych (zwanymi również technologią wielosensorową) w celu zminimalizowania liczby czujników i kosztów. Oprócz połączonego rozwiązania radaru i kamery, w pełni autonomiczna jazda wymaga również lidar, aby zapewnić redundancję dla analizy i lokalizacji obiektów. Eksperti przewidują, że w 2025 r. do produkcji seryjnej będą gotowe pierwsze samojezdne pojazdy poziomu 5. Tesla już teraz używa ośmiu kamer do całkowitego monitorowania otoczenia pojazdu w zakresie 360° na odległości do 250 m, a także dwunastu czujników ultradźwiękowych oraz ma na pokładzie radar skierowany do przodu. Wersje z lidarem nie są obecnie planowane w pojazdach Tesla.

Dane z czujników kamery, radaru, lidar, podczerwieni i czujników ultradźwiękowych są dalej przetwarzane za pomocą różnych algorytmów (np. sztuczna inteligencja i głębokie uczenie), a na ich podstawie system sterowania podejmuje decyzje.



Rys. 13. Pola czujników monitorowania środowiska w Audi Q3 Sportback (rys.: zdjęcie prasowe AUDI AG)

Kamery rozpoznają oznaczenia, znaki bezpieczeństwa, światła drogowe, osoby i inne pojazdy. Poza tym pomagają podczas parkowania i monitorowania ruchu. W lusterku bocznym przedstawiają obszar martwego pola. Kamery z funkcją noktowizyjną i podczerwieni pomagają kierowcy w ciemności.

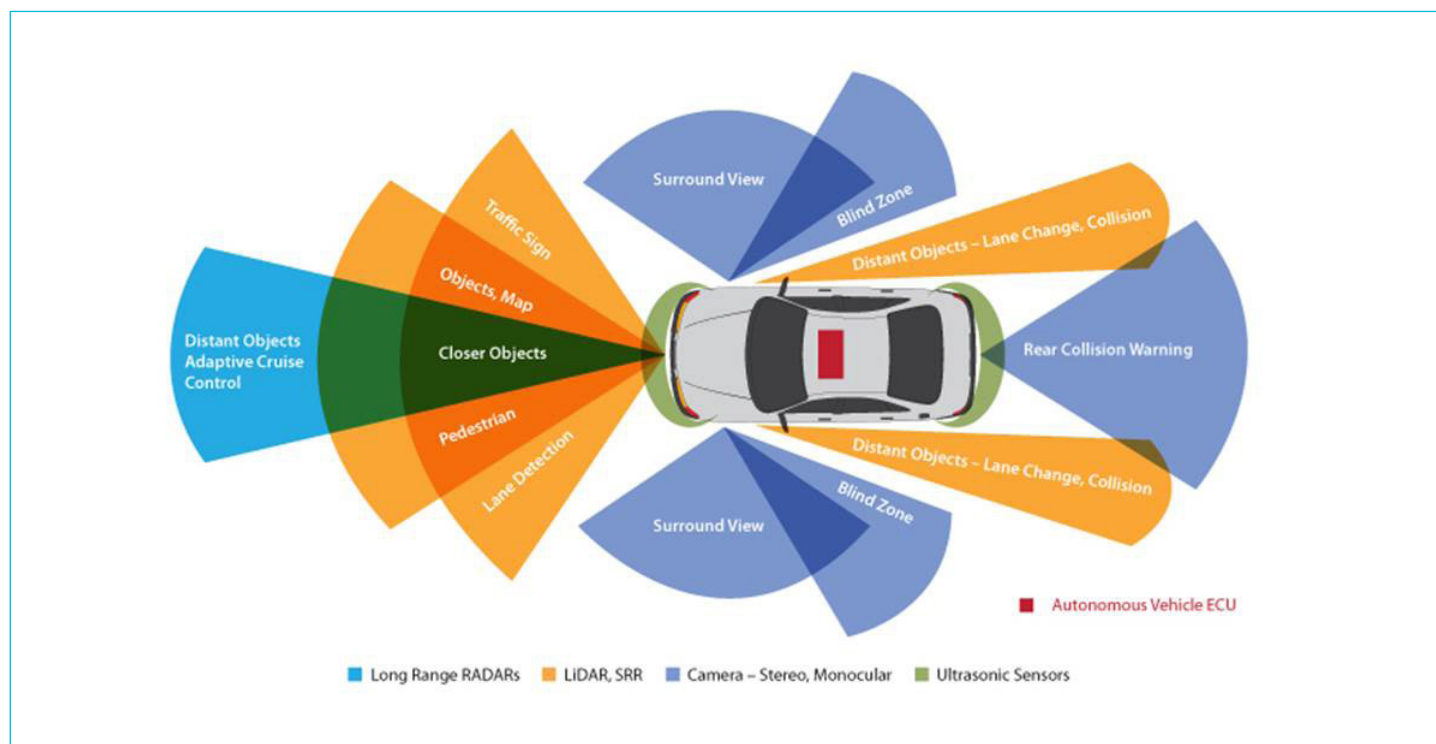
Istnieją kamery mono, które pokazują dwuwymiarowy obraz. Jednak brakuje w nich głębokości do pomiaru odległości, a radar i lidar muszą dostarczać dodatkowych informacji. Kamera stereo jest wyposażona w dwie soczewki. Za ich pomocą można wyświetlać informacje i zmiany w głębokości. Modele te są droższe niż kamery mono.

Jeśli obrazy z kilku kamer zostaną połączone powstanie trójwymiarowa reprezentacja. Kamery przednie o zasięgu od 100 do 240 metrów przedstawiają informacje takie jak oznaczenia, znaki bezpieczeństwa, pieszych i rowerzystów. Służą do kontroli odległości i rozpoznają zagrożenia, które wymagałyby hamowania awaryjnego.

Czipy kamer 3D oparte są np. na zasadzie czasu uciezki (zasada TOF; Time of Flight). Mierzą bezpośrednio wartości głębokości i amplitudy na piksel. W ten sposób dostępne są dane 3D, które można niezawodnie rejestrować we wszystkich warunkach oświetlenia otoczenia (w świetle słonecznym, w ciemności i w zmieniających się warunkach oświetlenia).

Zastosowanym źródłem światła może być dioda LED lub dioda laserowa (VCSEL; Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). Kamery TOF stosowane są jako precyzyjne czujniki położenia i czujniki wspomagające kierowcę. Należą do nich zastosowania takie jak aktywna ochrona pieszych, asystent hamowania awaryjnego, ale są także stosowane wewnątrz, np. do sprawdzania prawidłowej pozycji jazdy.

Obecna technologia kamer w samochodach (np. firmy Bosch) jest już wyposażona w sztuczną inteligencję. Dzięki temu może rozpoznawać obiekty i dzielić je na klasy, takie jak pojazdy, piesi czy rowery, a także mierzyć ruchy. Taka kamera może również wykrywać i klasyfikować częściowo zakryte lub przejeżdżające pojazdy, pieszych i rowerzystów w chaotycznym ruchu miejskim.



Rys. 14. W przypadku rozwiązań L4 i L5 do rejestrowania sytuacji drogowej stosuje się kombinacje czujników. (Rysunek: Zdjęcie prasowe KPIT Technologies GmbH)

Czujniki radarowe – mistrzowski pomiar odległości

Radar to technologia do pomiaru odległości. Czujniki radarowe w przednim i tylnym obszarze pojazdu rozpoznają inne pojazdy lub przeszkody. Tylny czujnik wykrywa pojazdy zbliżające się od tyłu i wyprzedzające. Radar dalekiego zasięgu monitoruje ruch drogowy, a radar bliskiego zasięgu kontroluje najbliższy obszar. Im szybciej wracają emitowane fale radiowe, tym bliższa jest odległość od mierzonego obiektu. Prędkość jest mierzona za pomocą zbliżania.

Radar można stosować niemal we wszystkich warunkach pogodowych. Jeśli pada intensywny deszcz, sygnał jest jednak osłabiony, mgła nie ma znaczenia. Zaawansowane czujniki radarowe zapewniają duży zasięg wykrywania, szeroki kąt otwarcia i dużą zdolność separacji kątów.

Czujniki radarowe w obszarze częstotliwości 77-/79-GHz z szerokością pasma do 4 GHz mogą zapewnić rozdzielczość odległości do kilku centymetrów. W celu lepszego rozpoznawania obiektów stosowane są szybkie sygnały świergotowe, które są bardziej wrażliwe na zakłócenia niż wolniejsze sygnały fali ciągłej z modulacją częstotliwości (FMCW). Radar bliskiego zasięgu wykrywa obiekty do ok. 30 metrów odległości, systemy dalekiego zasięgu mają zasięg do około 250 metrów.

Czujniki radarowe (Radio Detection and Ranging) wysyłają i odbierają fale elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości, aby określić odległość i względną prędkość do obiektu. Radary impulsowe wysyłają krótkie impulsy o określonej częstotliwości. Radary z falą ciągłą wysyłają ciągłe sygnały o zmienionych częstotliwościach. Czujniki radarowe 24 GHz służą do wykrywania bliskiego zasięgu (radar bliskiego zasięgu). Czujniki radarowe w zakresie częstotliwości 77-79 GHz zapewniają większe moce transmisji i mogą obejmować większe odległości. Są używane w średnim i długim zasięgu (radar średniego i dalekiego zasięgu). Czujniki radarowe fal milimetrowych działają bezkontaktowo w zakresie częstotliwości od 30 do 300 GHz. Ze względu na krótkie długości fal przy pomiarze odległości zapewniają rozdzielczość mniejszą niż jeden milimetr.

Czujniki lidarowe - i świat nagle staje się trójwymiarowy

Czujniki lidarowe funkcjonują podobnie jak radar, ale zamiast fal radiowych stosują wiązki laserowe. Ich odbicia tworzą trójwymiarowy, świetlny obraz obszaru wokół samochodu. Tak uzyskane dane mają wyższą rozdzielczość niż w przypadku radaru. W ten sposób można rozpoznać znaki bezpieczeństwa, oznaczenia na jezdni i ruch - w nocy czujniki te funkcjonują nawet lepiej niż czujniki kamery.

Czujniki lidarowe stosowane są także np. jako asystent hamowania. Emitowane wiązki laserowe mierzą prędkość i odległość. Jeśli zostanie rozpoznana przeszkoda (osoba, pojazd itd.), wspomaganie hamowania awaryjnego może spowodować pełne hamowanie.

Lidar oznacza „Light Detection and Ranging“, czyli mierzy odległości do stojących i poruszających się obiektów i przedstawia trójwymiarowe obrazy. Duże i drogie wersje laserowe (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - wzmocnienie światła przez stymulowaną emisję promieniowania) z obracającymi się lustrami są coraz częściej zastępowane przez lidary „półprzewodnikowe”. Układ diod półprzewodnikowych sterowany cyfrowo zastępuje ruchome części. Poza tym stosowane są lustra MEMS. Systemy lidarowe pracują z impulsami świetlnymi z obszarów niewidzialnego światła (w bliskiej podczerwieni, zazwyczaj o długości fali 905 nm). W dobrych warunkach pogodowych mają zasięg od 200 do 300 metrów, zapewniają wysoką rozdzielczość kątową i mogą obejmować obraz do 360 stopni (wersje dachowe). Wyniki skanerów lidarowych i laserowych mogą zostać ograniczone przez mgłę.

Czujniki, które nie wykorzystują żadnych ruchomych komponentów laserowych, to między innymi Velarray firmy Velodyne (rys. 15, środek), który wykrywa obszary pod kątem 120 stopni w poziomie, 35 stopni w pionie i z zasięgiem do 200 metrów. Za pomocą chmury punktów o wysokiej rozdzielczości czujnik (podobnie jak inne produkty tego producenta) dokładnie rozpoznaje chodniki, krawężniki, pojazdy, pieszych, rowery i inne przeszkody, nawet w złych warunkach oświetleniowych. Ponieważ się nie obraca, nadaje się szczególnie do wbudowania w podwozie.



Rys. 15. Produkt Alpha Prime (z lewej strony) zastępuje model HDL-64 producenta jako czujnik odniesienia (czujnik wzorcowy) i jest przeznaczony do użytku w RoboTaxi i ciężarówkach L4/L5. Produkt VelaDome (po prawej stronie) jest czujnikiem dla pojazdów autonomicznych, który wykrywa obszar półkuli (rys.: zdjęcie prasowe Velodyne Lidar)



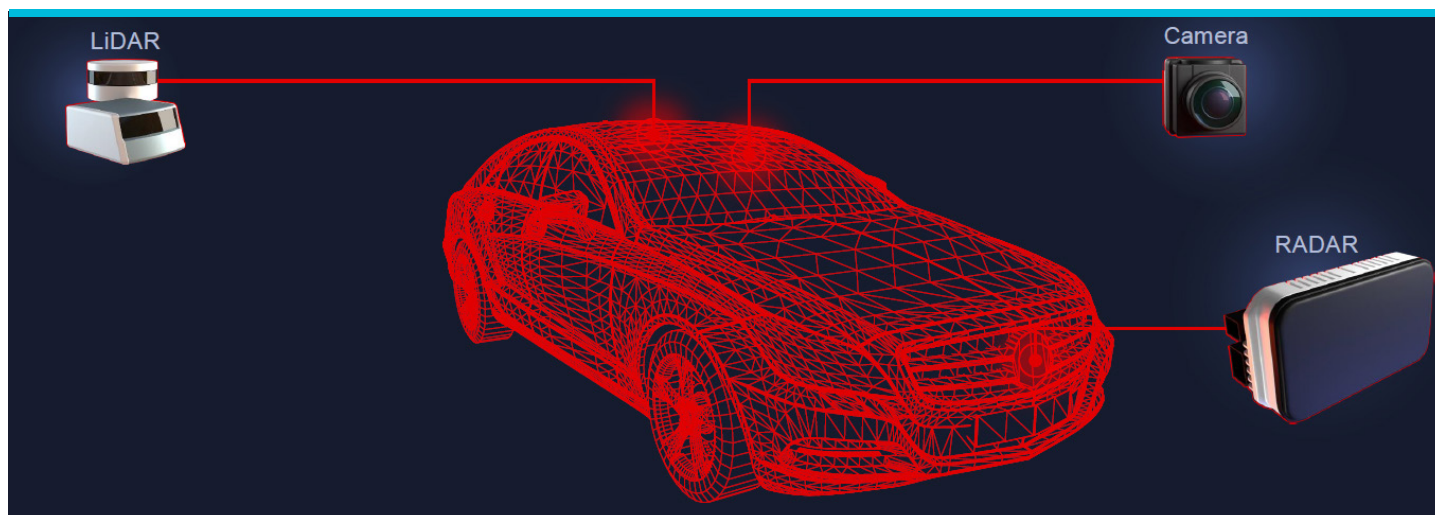
Rys. 16. ZF produkuje półprzewodnikowy system lidarowy „ibeoNEXT” wraz z jednostką sterującą (w imieniu Ibeo Automotive Systems GmbH) i rozpoczął dostawy tego produktu w październiku 2020 r. Czujnik lidarowy oparty jest na technologii pomiaru lasera fotonowego i nie ma ruchomych części (półprzewodnik).
(Rysunek: zdjęcie prasowe ZF Friedrichshafen AG)



Rys. 17. Firma Blickfeld oferuje czujnik lidarowy o nazwie Cube Range, który wykrywa przeszkody w odległości do 250 metrów. Lidar półprzewodnikowy 3D ma zasięg 150 metrów z 10-procentowym współczynnikiem odbicia; zasięg do 250 metrów jest możliwy przy wyższym współczynniku odbicia; rozdzielczość wynosi 0,18°. W produkcji zastosowano lustro MEMS wykonane z silikonu. Gęsta chmura punktów 3D jest przetwarzana w czasie rzeczywistym za pomocą stosu oprogramowania. Czujnik nadaje się do jazdy z prędkością autostradową.
(Rysunek: zdjęcie prasowe Blickfeld GmbH)

Integracja lidar w reflektorach umożliwia również mapowanie 3D w czasie rzeczywistym oraz rozpoznawanie, klasyfikację i śledzenie obiektów. Lidar jest również używany w mapowaniu HD do rejestrowania topografii dużych obszarów za pomocą mapowania 3D do autonomicznej nawigacji pojazdów.

Gotowy do produkcji radar obrazowania 4D (ARS 540) firmy Continental wykorzystuje platformę Zynq UltraScale + MPSoC firmy Xilinx. Oferuje funkcje zgodnie z SAE J3016 poziom 2 i jest skalowalny do poziomu 5 autonomicznych systemów jazdy. Radar obrazujący 4D określa lokalizację obiektu pod względem zasięgu, azymutu, wysokości i prędkości względnej. ARS540 ma zakres 300 metrów i widoczność $\pm 60^\circ$. Umożliwia śledzenie precyzyjnych prognoz popartych kilkoma hipotezami podczas jazdy. Ma to istotne znaczenie w przypadku złożonych scenariuszy przepływu ruchu takich jak wykrywanie korków pod mostami. Poza tym system umożliwia rozpoznanie potencjalnie niebezpiecznych obiektów na jezdni i odpowiednio reaguje.



Rys. 18. Dzięki platformie Xilinx, radar Continental (na dole po prawej) może pracować z obecną konfiguracją platformy czujników w sposób neutralny systemowo. Równoległe przetwarzanie w programowalnej logice komponentu i liczne segmenty DSP do cyfrowego przetwarzania sygnałów umożliwiają przyspieszenie sprzętowe sygnałów wejściowych z czujników radarowych w czasie rzeczywistym. (Rysunek: zdjęcie prasowe Xilinx)

Prognoza

Analicyści Yole przewidują, że rynek lidarów do zastosowań motoryzacyjnych i przemysłowych wyniesie w 2020 r. około 1,7 miliarda dolarów. Oczekiwany wzrost to 19%. W 2025 r. Yole spodziewa się sprzedaży na poziomie 3,8 mld USD. Aplikacje motoryzacyjne mogą być główną siłą napędową lidarów w ciągu najbliższych pięciu lat – ze wzrostem o 1,8 miliarda USD – ustalonym pomiędzy 2019 a 2025 r. Ponieważ producenci lidarów i pojazdów nawiązali już ze sobą współpracę, firma Yole zajmująca się badaniami rynku i doradztwem strategicznym przewiduje, że do 2025 r. technologia lidarowa będzie stosowana w 3,2% samochodów. Według Yole wpływ pojazdów-robotów na rozwój lidarów będzie bardziej umiarkowany, ponieważ ich liczba nie rośnie w tak szybkim tempie. Także lidary do samochodów są teraz postrzegane bardziej krytycznie, ponieważ producenci pojazdów znajdują się pod silną presją finansową z powodu kryzysu COVID-19. Według Yole rozporządzenia mające na celu redukcję emisji CO2 mogą spowodować, że pojawi się więcej inwestycji w elektryfikację. Poza tym Yole dostrzega także duży wpływ Tesli, która rozwija autonomiczne pojazdy bez lidarów. (Źródło: komunikat prasowy z dnia 27.08.2020 „Lidar musi radzić sobie z przeszkodami: Czy dywersyfikacja jest dobrym rozwiązaniem? - Yole Développement)

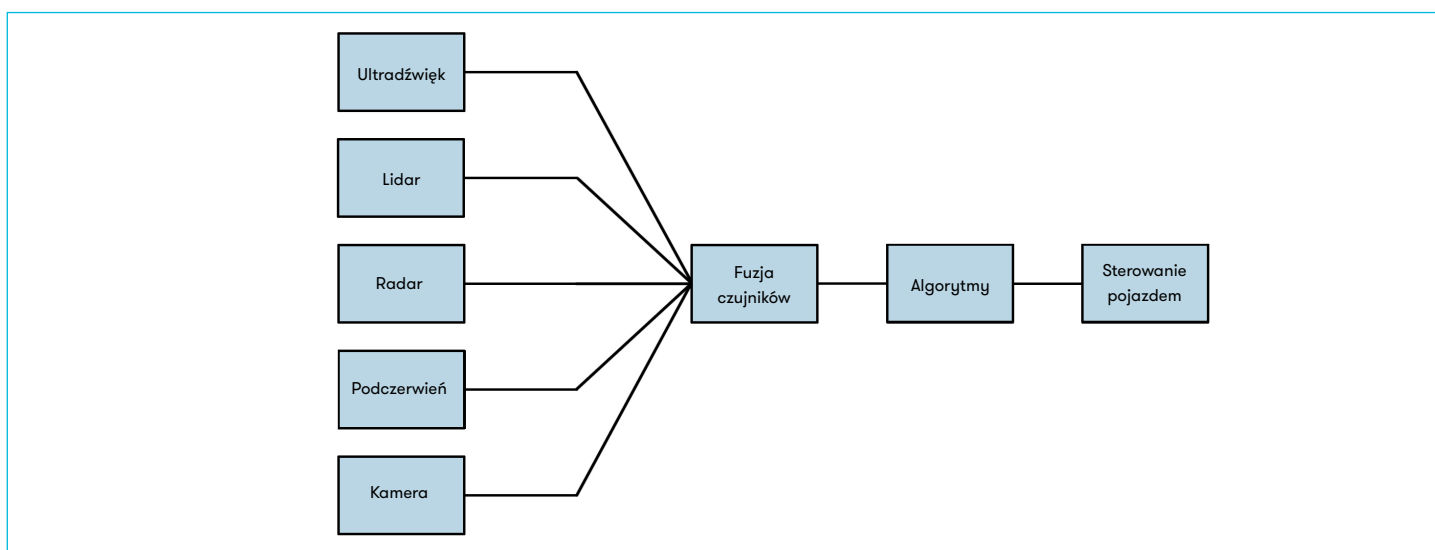
Inne czujniki otoczenia

Czujniki podczerwieni umożliwiają widzenie w nocy. Czujniki ultradźwiękowe pomagają w parkowaniu, mogą mierzyć miejsca parkingowe podczas jazdy i wykrywać pojazdy na sąsiednim pasie. W ten sposób mogą monitorować martwe pole. Czujniki ultradźwiękowe mierzą odległość do obiektu, określając czas przejścia odbitych impulsów dźwiękowych. Są kompaktowe i wytrzymałe, działają także w nocy lub we mgle. Śnieg wpływa na wyniki pomiarów, a odległości wynoszą kilka metrów. Aby poprawić rejestrowanie otoczenia, można zastosować kilka czujników ultradźwiękowych i metodę triangulacji. Specjalnie ukształtowane anteny nadają emitowanym impulsom ultradźwiękowym charakterystykę kierunkową dla promieniowania kierunkowego. Tak powstają pola bliskie i dalekie.

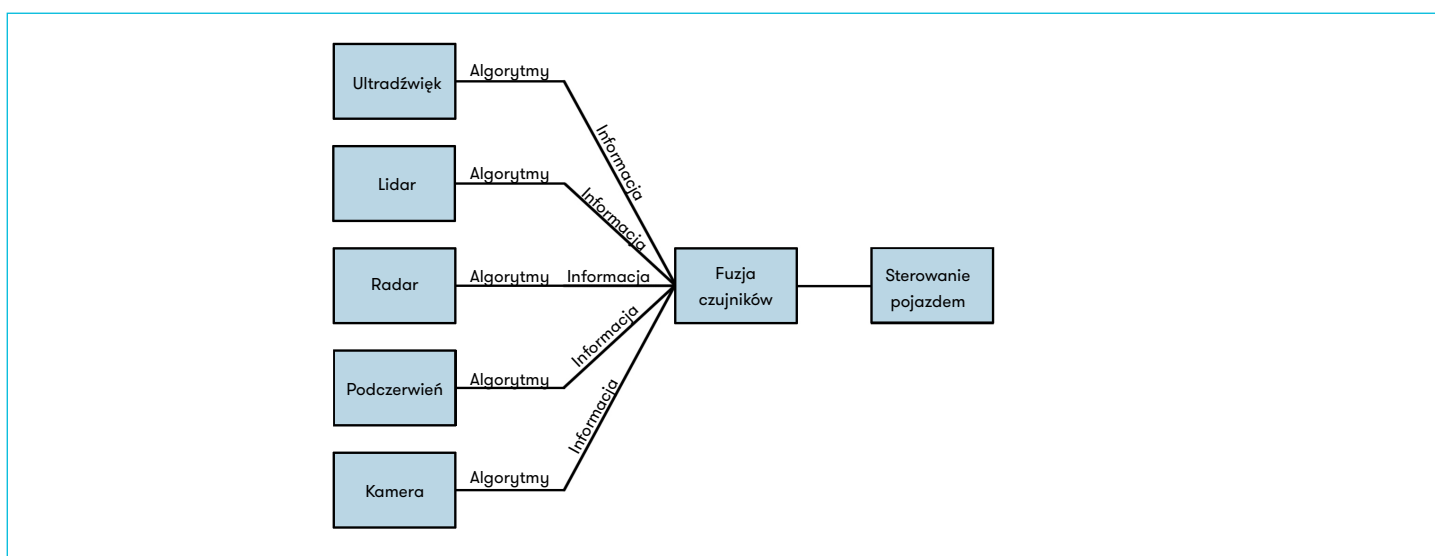
Wielu żeglarzy i jeden sternik

Czujniki mogą pełnić niezależne funkcje. Jeśli jednocześnie powiąże się wszystkie dane za pomocą fuzji czujników, można osiągnąć nową jakość sterowania. Główny nacisk kładzie się przy tym na niezawodność funkcjonalną, redundancję i kontrole wiarygodności. W tym celu sygnały z czujników pojazdu są ze sobą porównywane. W ten sposób unika się nieprawidłowej interpretacji danych, a sygnał sterujący jest podawany tylko wtedy, gdy wszystkie dane zostały sprawdzone.

Ważne jest, aby zebrać dane z czujników na potrzeby koncepcji pojazdów autonomicznych. W tym celu dane ze wszystkich czujników (lidar, radar, ultradźwięki itp.) są analizowane i porównywane w czasie rzeczywistym. Dopiero wtedy wyzwalana jest reakcja pojazdu. W tym przypadku przetwarzanie danych czujnika może odbywać się całkowicie po fuzji czujników (rys. 19) lub też w czujnikach inteligentnych zachodzi wstępne przetwarzanie danych (rys. 20).



Rys. 19. Uproszczony schemat wskazuje po lewej stronie czujniki, które dostarczają dane do jednostki fuzji czujników. Tam są one przetwarzane za pomocą różnych algorytmów, a informacje o reakcjach są przekazywane do systemu sterowania pojazdem (rys.: channel-e)



Rys. 20. Uproszczony schemat wskazuje po lewej stronie czujniki, które integrują już inteligentne funkcje przetwarzania i dostarczają wstępnie przetworzone dane do jednostki fuzji czujników. Tam są wykonywane funkcje porównawcze, obliczany jest model otoczenia i przekazywana jest informacja o reakcji do systemu sterowania pojazdem (rys.: channel-e)

Informacje z radaru, ultradźwięków, lidarów i kamery są łączone w celu wykrywania otoczenia autonomicznych pojazdów. Zmierzone wartości są generowane asynchronicznie, a jednostka sterująca fuzji oblicza aktualny model otoczenia w czasie rzeczywistym, a następnie steruje układem kierowniczym, napędowym i hamulcowym.

Z czysto formalnego punktu widzenia istnieją połączenia komplementarne, konkurujące i kooperacyjne. Fuzja komplementarna łączy dane z kilku niezależnych czujników. Ilość danych jest w tym przypadku bardzo duża, a informacje z poszczególnych czujników mogą się uzupełniać w zakresie obszaru detekcji i mierzonej zmiennej (przykład: kilka kamer generuje obraz 360°).

Fuzja konkurencyjna wykorzystuje identyczne informacje z kilku czujników w celu zwiększenia dokładności pomiaru i zapewnienia redundancji (przykład: powiązanie przedniego radaru i przedniego lidarów). Fuzja kooperacyjna wymaga informacji z różnych niezależnych czujników, z których każdy mierzy częściowy aspekt. Nie ma tutaj redundancji (przykład: kamera stereo wykorzystuje dane z dwóch kamer)

Jakie ilości danych mają być przetwarzane

Wszystkie czujniki generują bardzo dużo danych. Eksperci Infineon obliczają tę ilość następująco:

Kamera HD: dostarcza nieprzetworzone dane w rozdzielczości 1280 × 960 (kamera kolorowa) przy 25 klatkach/s = minimum 1,2 GBit/s. W niektórych systemach ten surowy obraz jest przesyłany do komputera centralnego i tam przetwarzany. Zwykle do systemu podłączonych jest kilka kamer i istnieją także systemy o rozdzielczości wyższej niż HD, dlatego dane z kamery szacuje się na 2 do 6 Gbit/s.

Ale: W wielu systemach kamer dane wizyjne są już „wstępnie przetworzone” i przekształcone na listy obiektów oraz przekazane dalej. Dlatego te czujniki kamer obsługują obecnie prędkości transmisji od 100 Mbit/s do 1 Gbit/s. Nie przesyłają więc obrazu, ale tylko dynamiczne listy obiektów.

Radar: W przypadku radaru w czujniku generowane są obecnie nieprzetworzone dane z szybkością od 500 Mbit/s do 2 Gbit/s, ale są one również przekształcane w czujniku na detekcje i listy obiektów, a następnie przekazywane dalej przez magistralę CAN lub Ethernet (tj. z 5 Mbit/s, 10 Mbit/s lub 100 Mbit/s). Jednak w przyszłości przemysł motoryzacyjny będzie wolał przysyłać surowe dane z radarów o wysokiej rozdzielczości do komputera centralnego, więc wkrótce prędkość może wzrosnąć do 48 Gbit/s.

Lidar: W przypadku lidarów surowe dane o szybkości od 10 do 100 Gbit/s są już generowane w czujniku – w zależności od rozdzielczości, pola widzenia i liczby klatek na sekundę – ale tam również dane są przetwarzane już w czujniku na listy obiektów i przekazywane dalej z maksymalną prędkością 1 Gbit/s. Ponieważ w najbliższej przyszłości przetwarzanie surowych danych w komputerze centralnym przyniesie również korzyści dla fuzji czujników, szacuje się, że szybkość transmisji wzrośnie do 48 Gbit/s.

Współczynnik czasu w fuzji czujników

Podczas fuzji na poziomie sygnału łączone są surowe dane lub dane przetworzone w niewielkim stopniu. Zaletą jest to, że nie dochodzi do utraty informacji, a wada polega na tym, że powstaje za dużo danych. Podczas fuzji na poziomie funkcji dane z czujników są wstępnie przetwarzane niezależnie od siebie. Wyodrębnione cechy są następnie łączone na wyższym poziomie abstrakcji. Pozwala to na powiązanie różnych mierzonych zmiennych i zmniejszenie ilości danych. Podczas fuzji na poziomie obiektu dane z poszczególnych czujników są przetwarzane niezależnie od siebie i łączone dopiero na końcu. Ilość przetwarzanych danych jest zminimalizowana, ale dochodzi do utraty informacji.

Monitoring czujników wewnątrz pojazdu

Czujniki zapewniają również bezpieczeństwo poprzez kontrolę sytuacji wewnątrz pojazdu. Kierowca jest obserwowany i analizowany przez różne czujniki. Proces ten ma na celu np. rozpoznanie przemęczenia i rozproszenia uwagi (np. mikrosnu).

- Można na przykład monitorować zachowanie kierowcy podczas kierowania pojazdem. Systemy drive-by-wire rejestrują np. położenie kątowe i prędkości obrotowe. Dane pochodzą z czujników i są przesyłane do mikrokontrolera za pośrednictwem interfejsu, a następnie są przetwarzane. Tutaj również stosowana jest zasada działania inteligentnego czujnika, a dane są poddawane zintegrowanemu przetwarzaniu wstępnemu, odciążając w ten sposób mikrokontroler. W połączeniu z informacjami takimi jak długość jazdy, czas trwania i godzina można przewidzieć prawdopodobne zmęczenie. Wówczas kierowca otrzymuje przypomnienie o zrobieniu przerwy.
- Czujniki obrazu 3D mogą kontrolować ruchy głowy i oczu, a także oddech i tętno (nieinwazyjnie).
- Korzystając z technologii rozpoznawania 2D, w kierownicy można wbudować czujniki dotykowe, które rozpoznają gesty. Mogą to być np. dotykanie lub przesuwanie jednym palcem lub łączenie i obracanie dwoma palcami. Kierowca może w ten sposób zmieniać ustawienia bez odrywania rąk od kierownicy. Dzięki rozpoznawaniu 3D może też używać większych gestów w powietrzu. Trudno jest jednak odróżnić nieistotne ruchy dłoni od świadomych poleceń za pomocą gestów. W tym celu można np. stosować oprogramowanie z modelami stochastycznymi.
- Czujniki wizualne: We wnętrzu pojazdu zastosowano kamery kolorowe i na podczerwień oraz kamery RGB-D. Monitorowane są parametry fizyczne, takie jak pozycja głowy w stosunku do siedzenia i przedniej szyby, kąt obrotu głowy, ruch oczu, zmiany brwi i wzorce spojrzenia. Z tych danych wyciąga się wnioski na temat poziomu stresu danej osoby.
- Czujniki dotykowe: Czujniki wbudowane w fotel kierowcy mierzą rozkład nacisku na masę kierowcy. Interfejs wyprowadza zmierzone wartości, a ich kolejność chronologiczna jest zapisywana. Odpowiednią matę można dostosować do różnych siedzeń samochodowych, różnych rozmiarów ciała i wagi.

Podsumowanie

Dalszy rozwój technologii czujników w obszarach IIoT, przemysłu motoryzacyjnego, medycznego automatyzacji budynków, branży gier, technologii środowiskowej, pomiarów i wszystkich innych obszarach zastosowań będzie prowadzić do powstawania coraz bardziej inteligentnych, energooszczędnych i coraz bardziej połączonych w sieć technologii czujników. Nawet czynniki utrudniające sytuację na rynku takie jak obecna związana z COVID-19, mogą doprowadzić do nowych zastosowań. Obecnie dostępne są oferty takie jak mierniki jakości powietrza, czujniki odległości i oczywiście wiele zastosowań w technologii medycznej. Im szybciej, dokładniej i rozsądniej (np. dzięki sztucznej inteligencji) będą przetwarzane dane dostarczane przez czujniki, tym większe będą korzyści ekonomiczne, techniczne i humanitarne płynące z tego procesu.