Interfejsy kamer

Wprowadzenie

W zależności od sposobu wykorzystanie obrazów, wymagania co do sposobu jego przesyłania różnią się diametralnie. Dla monitoringu chcemy przesyłać ciągły strumień obrazów, często na duże odległości, najlepiej używając kompresji. Dla widzenia maszynowego przesyłamy pojedyncze obrazy, często bardzo wysokiej rozdzielczości, powtarzane w dużych odstępach czasu, gdy kontrolowany przedmiot pojawia się przed kamerą albo przeciwnie, obrazy zbierane z ekstremalną częstością. Obraz najczęściej jest przetwarzany blisko kamery, na tym samym stanowisku (*Edge Computing*)

Spis treści

WPROWADZENIE 1
SPECYFIKA ZASTOSOWAŃ 2
OMÓWIENIE INTERFEJSÓW 3
PORÓWNANIE 4
PODSUMOWANIE 6

© A1Pixel sp z o.o. ul. Krasińskiego 15/3, 87-100Toruń, Polska, www.a1pixel.pl ,

Specyfika zastosowań

- **Machine Vision:** Kluczem jest przesył obrazu **nieskompresowanego** w celu zachowania precyzji pomiarów, mikrosekundowy determinizm czasowy oraz sprzętowe wyzwalanie (GPIO/Trigger).
- **Streaming:** Priorytetem jest standaryzacja Plug-and-Play (sterowniki klasy UVC), niska cena oraz często wstępna kompresja (H.264/H.265/MJPEG) bezpośrednio w kamerze.
- **Broadcast:** Wymaga dystansów liczonych w setkach metrów/kilometrach, idealnej synchronizacji wielu kamer jednocześnie (Genlock) oraz integracji wideo, audio i metadanych w jednym przewodzie (SDI lub nowocześnie Video-over-IP.

© A1Pixel sp z o.o. ul. Krasińskiego 15/3, 87-100Toruń, Polska, www.a1pixel.pl ,

Omówienie interfejsów

- **USB 3.0 / USB 3.2:** Popularne, proste, tanie, wydajne (od 5 do 20 Gbps), lecz ograniczone dystansem (3–5 metrów dla miedzi). Generuje obciążenie dla procesora (CPU) komputera. Standard *USB3 Vision* zabezpiecza mechanicznie wtyki za pomocą śrub blokujących.
- **1GigE do 100GigE (GigE Vision):** Standardy 1G i 10G oparte na miedzi zapewniają zasięg do 100 metrów. Najnowsze generacje **25GigE oraz 100GigE** wprowadzją łącza światłowodowe znane z telecom (moduły SFP28 i QSFP28), oferując transfery do 12.5 GB/s bez kompresji, brak podatności na zakłócenia elektromagnetyczne i zasięgi liczone w kilometrach.
- **HD-SDI / 3G-SDI / 12G-SDI:** Jednokierunkowy standard broadcastowy oparty na złączach BNC i kablu koncentrycznym. Gwarantuje brak opóźnień (zero-latency) na odległość do 100 metrów dla rozdzielczości od Full HD do 4K.
- **Camera Link:** powoli wygasający standard przemysłowy. Wymaga dedykowanych kart frame grabberów, ma bardzo grube i sztywne kable ograniczone do 7-10 metrów.
- **CoaXPress (CXP):** Topowy standard dla szybkich kamer przemysłowych. Wersja CXP-12 osiąga 12.5 Gbps na jednym kablu koncentrycznym. Łącząc 4 kable, uzyskujemy 50 Gbps z zachowaniem pełnego determinizmu i jednoczesnego zasilania kamery (PoCXP).
- **MIPI CSI-2 / GSML2:** Rozszerzona wersja CSI-2 z deterministycznym timingiem dla global-shutter. 6–18 Gbps, połączenia wstążką FFC 30–50 cm lub kilka metrów przez serializatory-przewód coax-deserializatory. Robotyka, drony, FPGA/SoC.
- **MIPI FPD-Link III:** Interfejs motoryzacyjny i embedded. Obraz + sterowanie + I^2C jednym przewodem. Dystans do 15 m, wysoka odporność na EMI, kamery ADAS(*).
- **MIPI A-PHY:** Do 16 Gbps, dystans do 15 m. Niskie EMI, pełna zgodność z CSI-2/DSI. Motoryzacja, systemy autonomiczne.

*(*) **ADAS** :Advanced Driver Assistance Systems*

Porównanie

Poniższa tabela przedstawia chronologiczne i technologiczne zestawienie interfejsów stosowanych w systemach wizyjnych, streamingu oraz broadcastu telewizyjnego

Interfejs	Przepustowość	Maks. długość kabla	Popularność	Zastosowanie w rynkach
USB 2.0	480 Mbps	Do 5 ..10 m	Średnia (wygasająca)	Tanie mikroskopy, stare kamery przemysłowe, proste kamery internetowe.
USB 3.0 **(3.2 Gen 1)**	5 Gbps (~400 MB/s)	3 - 7 m (miedź)	Bardzo wysoka	Machine Vision (krótkie dystanse), streaming, inspekcja PCB, biometryka.
USB 3.2 Gen 2	10 Gbps (~900 MB/s)	1 - 2 m (miedź)	Średnia	Szybkie kamery laboratoryjne, nowoczesny streaming 4K, aplikacje Plug-and-Play.
USB 3.2 Gen 2x2	20 Gbps (~1.8 GB/s)	Mniej niż 1 m	Niska	Niszowe systemy o dużej przepustowości, gdzie wymagany jest brak dedykowanych kart.
1GigE **(1000BASE-T, 1Base-T)**	1 Gbps (~125 MB/s)	Do 100 m	Ekstremalnie wysoka	Klasyczna wizja maszynowa, logistyka, monitoring przemysłowy, długie linie montażowe.
2.5GigE / 5GigE	2.5 / 5 Gbps	Do 100 m (Cat6)	Wysoka (rosnąca)	Ekonomiczny upgrade systemów 1G, inspekcja farmaceutyczna, średnio-szybka robotyka.
MIPI CSI-2	6–18 Gbps	0.3m wstążka	Ekstremalnie wysoka	Robotyka, drony
MIPI FPD-Link III	4–6 Gbps	15 m (coax)	wysoka	Motoryzacja, ADAS
GSML2	6–18 Gbps	kilka m coax	wysoka	Automotive, robotyka
MIPI A-PHY	16 Gbps	15 m (coax)	wysoka	Autonomia, automotive

Interfejs	Przepustowość	Długość kabla	Popularność	Zastosowanie w rynkach
10GigE (NBASE-T)	10 Gbps (~1.2 GB/s)	Do 100 m (Cat6A)	Wysoka	Wizja maszynowa wysokiej prędkości, systemy wielokamerowe.
25GigE	25 Gbps (~3.1 GB/s)	Kilometry (Światłowód) 3-5 m (DAC)	Średnia (high-end)	Szybka produkcja (inspekcja butelek), sportowa analiza slow-motion, IP Broadcast.
100GigE	100 Gbps (~12.5 GB/s)	Kilometry (Światłowód) 1-3 m (DAC)	Niska (top high-end)	Weryfikacja wafli krzemowych, metrologia lotnicza, systemy naukowe, centralne węzły transmisyjne.
HD-SDI	1.485 Gbps	Do 100 m (koncentryk)	Wysoka (w broadcast)	Tradycyjna produkcja telewizyjna, studia nagraniowe, transmisje HD na żywo.
3G-SDI	2.970 Gbps	Do 100 m (koncentryk)	Wysoka (w broadcast)	Systemy reżyserskie, telewizja na żywo w standardzie 1080p60, eventy.
12G-SDI	12 Gbps	Do 50-70 m (koncentryk)	Wysoka (w broadcast)	Nowoczesny Broadcast 4K, wojskowe systemy wideo, produkcja filmowa.
Camera Link (Base)	2.04 Gbps (~255 MB/s)	Do 10 m (wielożyłowy)	Niska (wygasająca)	inspekcja linii produkcyjnych, metrologia.
Camera Link (Full/Deca)	6.8 Gbps (~850 MB/s)	Do 5-7 m (wielożyłowy)	Niska (wygasająca)	inspekcja linii produkcyjnych, metrologia.
CoaXPress 1.1 (CXP-6)	6.25 Gbps (na kabel)	Do 100 m (koncentryk)	Średnia	Inspekcja przemysłowa dużych powierzchni,
CoaXPress 2.0 (CXP-12)	12.5 Gbps (do 50 Gbps w konfiguracji x4)	Do 40 m (CXP-12) Do 100 m (CXP3,6)	Wysoka (w liniach high-speed)	Inspekcja wyświetlaczy (FPD), zaawansowany przemysł półprzewodników, najszybsze kamery MV.

Podsumowanie

Interfejsy USB: Choć standardy USB 3.2 Gen 2/2x2 oferują wysoką przepustowość, ich ograniczenia dystansowe (często poniżej 1–2 metrów) eliminują je z dużych hal produkcyjnych. Systemy USB 3.1 dominują w laboratoriach na stanowiskach typu desktop.

Ethernet: Standardy od 1GigE do 100GigE oferują najbardziej liniową ścieżkę modernizacji systemu. Dzięki wykorzystaniu infrastruktury sieciowej IT i światłowodów, najwyższe standardy (25G/100G) umożliwiają integrację najszybszych kamer bez problemów z zakłóceniami EM, które paraliżują połączenia miedziane.

Standardy dedykowane (SDI vs CoaXPress): Interfejsy SDI ewoluują ściśle pod dyktando rynku Broadcast, gwarantując stałe odświeżanie bez kompresji oraz natychmiastowy podgląd. Z kolei CoaXPress 2.0 to król wydajności w Machine Vision – pozwala na agregację pasm do 50 Gbps za pomocą 4 przewodów koncentrycznych z zachowaniem bezwzględnego determinizmu czasowego.

MIPI FPD-Link III, CSI-2/GSML2 i A-PHY wprowadzają pełną integrację kamer w motoryzacji, robotyce i systemach embedded.