Rolling Shutter vs. Global Shutter

Wprowadzenie

Dopóki kamera jest zasilana, piksele matrycy są aktywne. Światło jest stale przechwytywane, jednak nośniki ładunku nie są akumulowane, lecz nieustannie usuwane.

Rozpoczęcie ekspozycji zatrzymuje usuwanie i rozpoczyna akumulację nośników ładunku. Odczyt pikseli następuje po zakończeniu ekspozycji. Do tego momentu matryce zachowują się tak samo w obu metodach ekspozycji.

Mechanizm kontroli ekspozycji nazywamy migawką (shutter). W uproszczeniu, gdy migawka jest zamknięta, piksel nie gromadzi ładunku gdyż jest zwarty przez tranzystor.

Wybór metody pracy migawki w sensorach CMOS decyduje o sposobie ekspozycji pikseli matrycy na światło oraz o sekwencji transferu ładunku elektrycznego do przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC). Różnice te determinują przydatność kamery do rejestracji obiektów w szybkim ruchu.

Spis treści

WPROWADZENIE 1
MECHANIZM DZIAŁANIA 2
Rolling Shutter (Migawka Szczelinowa / Krocząca) 2
Global Shutter (Migawka Globalna / Centralna) 2
PORÓWNANIE OBRAZÓW W TYPOWYCH SYTUACJACH POMIAROWYCH 3
KOMPENSACJA EFEKTU ROLLING-SHUTTER 5
ZESTAWIENIE 7
PODSUMOWANIE 8
DODATEK: KONSTRUKCJA SENSORA I MECHANIZMY ODCZYTU 9
Konstrukcja matrycy 9
Rolling Shutter 9
Global Shutter 9
Mechanizm konwersji i odczytu 10
Rolling Shutter: Odczyt sekwencyjny 10
Global Shutter: Odczyt symultaniczny z pamięcią ramki 10
Podsumowanie 11

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

Mechanizm działania

Rolling Shutter (Migawka Szczelinowa / Krocząca)

W sensorach typu Rolling Shutter linie pikseli są naświetlane i odczytywane sekwencyjnie – rząd po rzędzie, zazwyczaj od góry do dołu matrycy. Istnieje stałe przesunięcie czasowe pomiędzy rozpoczęciem ekspozycji pierwszej a ostatniej linii (tzw. czas odczytu matrycy - readout time). Choć cała klatka może mieć krótki czas naświetlania (np. 1/2000 s), to proces rejestracji jej skrajnych fragmentów jest rozciągnięty w czasie (np. o 0.01 …0.02 s). Konstrukcja ta jest tańsza i charakteryzuje się mniejszym poziomem szumów oraz wyższą czułością i zakresem dynamicznym, gdyż każdy piksel posiada prostszą strukturę elektroniczną (mniej tranzystorów).

Global Shutter (Migawka Globalna / Centralna)

W sensorach typu Global Shutter wszystkie piksele matrycy rozpoczną i kończą ekspozycję dokładnie w tym samym momencie. Po zakończeniu naświetlania, ładunek ze wszystkich pikseli jest jednocześnie transferowany do wewnętrznych komórek pamięci analogowej (storage nodes) znajdujących się bezpośrednio przy każdym pikselu, a stamtąd odczytywany sekwencyjnie. Obraz reprezentuje idealny zamrożony moment w czasie. Architektura ta wymaga bardziej skomplikowanej struktury piksela (dodatkowe tranzystory ekranujące i pamięciowe), co skutkuje wyższym kosztów produkcji, nieznacznie wyższym szumem odczytu oraz mniejszym współczynnikiem wypełnienia piksela (Fill Factor).

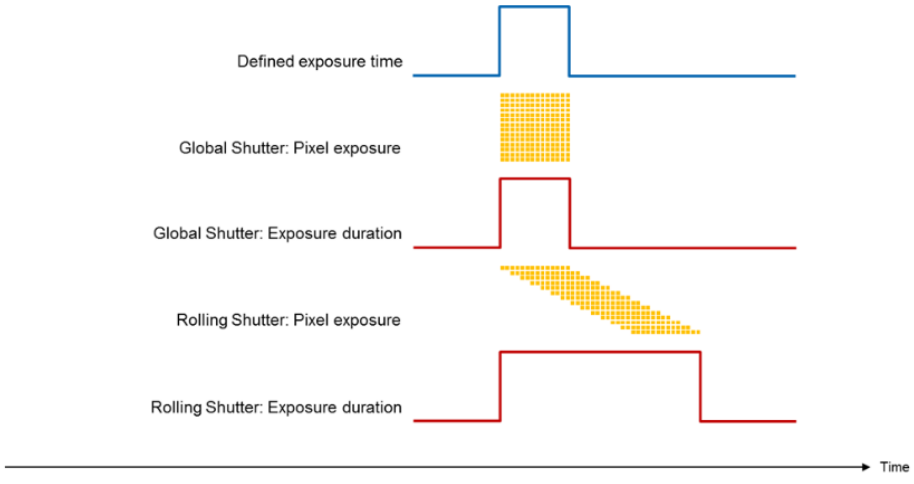


Fig. 1. Ekspozycja global shutter vs rolling shutter

Porównanie obrazów w typowych sytuacjach pomiarowych

Różnice w sposobie akwizycji manifestują się charakterystycznymi zniekształceniami geometrycznymi (artefaktami) w określonych scenariuszach dynamicznych:

Szybki ruch liniowy (efekt pochylenia / skew): Rozważmy prostokątny obiekt poruszający się prostopadle do osi kamery. W sensorze Rolling Shutter obiekt przemieszcza się poziomo w trakcie pionowego odczytu matrycy. Skutkuje to pochyleniem pionowych linii (prostokat staje się ukośny). W sensorze Global Shutter obiekt zachowuje idealną geometrię, linie pionowe pozostają proste.

Fig. 2. Efekty przy ruchu liniowym obiektu

Szybki ruch obrotowy (efekt śmigła / Jello): Łopatki wentylatora, śmigła lub wirujące elementy maszyn poruszają się z prędkością kątową porównywalną z prędkością odczytu rzędów matrycy Rolling Shutter. Powoduje to nienaturalne wygięcie łopatek w łuki, ich nienaturalne pogrubienie lub całkowite rozczłonkowanie. Global Shutter idealnie 'zamraża' ruch obrotowy – łopatki są idealnie proste i ostre.

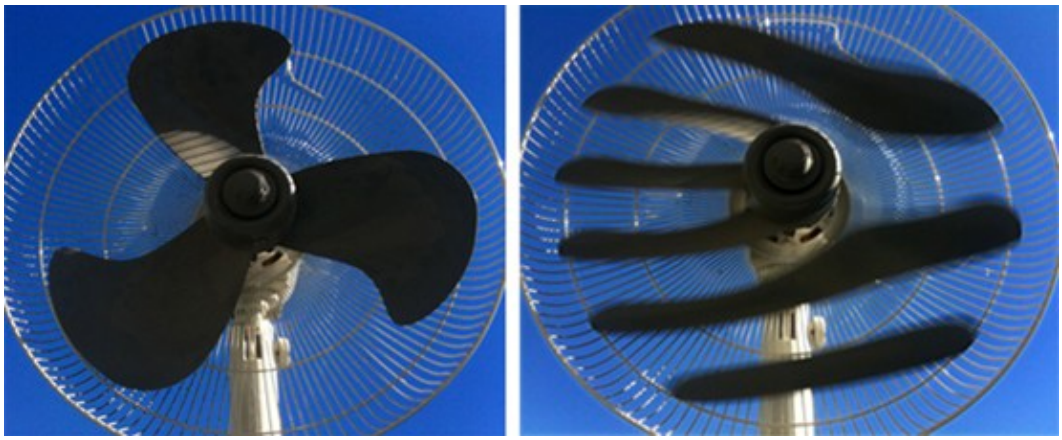


Fig 3. Efekty przy ruchu obrotowym obiektu

Drgania i wibracje o wysokiej częstotliwości: Wibracje o wysokiej częstotliwości (np. drony, silniki spalinowe, mocowania maszyn) nakładają się na sekwencyjny odczyt linii Rolling Shutter, powodując falowanie obrazu i efekt galarety (Jello effect). Obraz traci stabilność przestrzenną. W przypadku Global Shutter wibracje mogą powodować ogólne rozmycie ruchu (motion blur), ale struktura przestrzenna kadru nie ulega falowaniu. (Link do filmu Youtube Rolling vs Global)

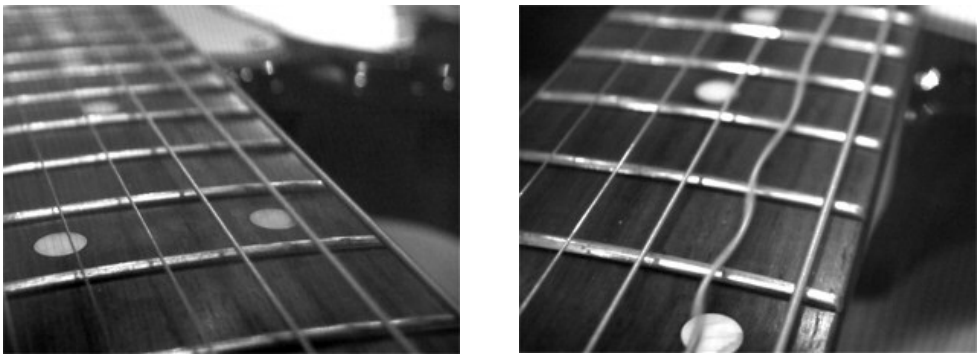


Fig. 4. Efekty przy wibrującym obiekcie.

Zmiany oświetlenia (flesz, światło stroboskopowe): Błyski stroboskopowe, flesze lub spawanie łukowe trwają krócej niż pełny odczyt matrycy Rolling Shutter. Powoduje to naświetlenie tylko części rzędów matrycy (na obrazie powstają poziome, jasne i ciemne pasy). W kamerach Global Shutter błysk oświetla całą matrycę równomiernie – klatka jest w całości jasna lub w całości ciemna.

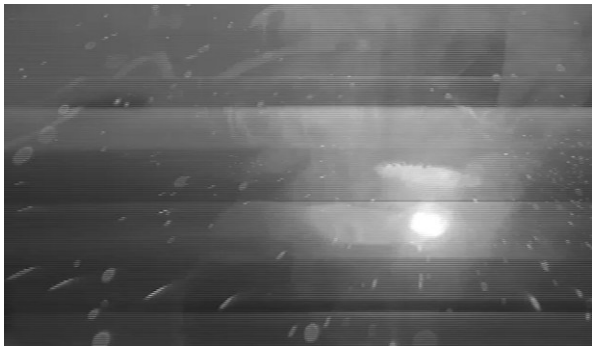


Fig. 5. Sensor rolling shutter: efekty przy impulsowym spawaniu MAG.

Kompensacja efektu rolling-shutter

Niektóre matryce rolling shutter maja funkcję resetu globalnego. Podobnie jak w przypadku ekspozycji migawki globalnej, akumulacja nośników ładunku w każdym pikselu rozpoczyna się w tym samym momencie. Odczyt odbywa się jednak linia po linii z przesunięciem czasowym – typowym dla rolling shutter

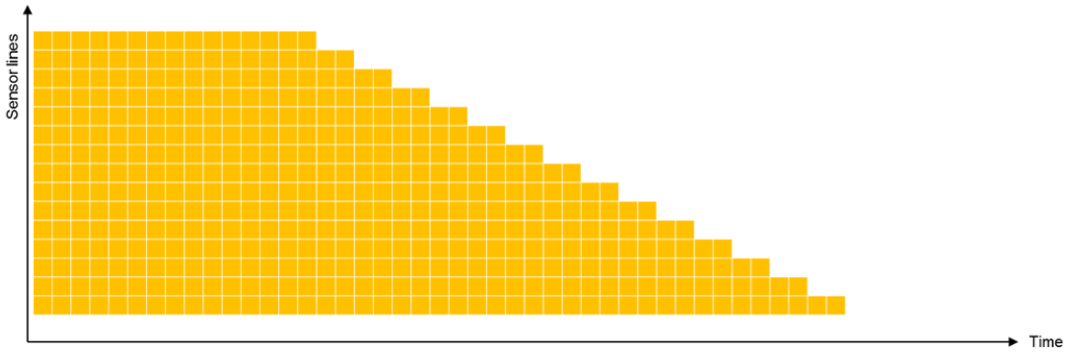


Fig. 6. Ekspozycja rolling shutter z funkcją global reset

Każda linia jest naświetlana przez inny okres czasu, co uwidocznia się przez gradient jasności.

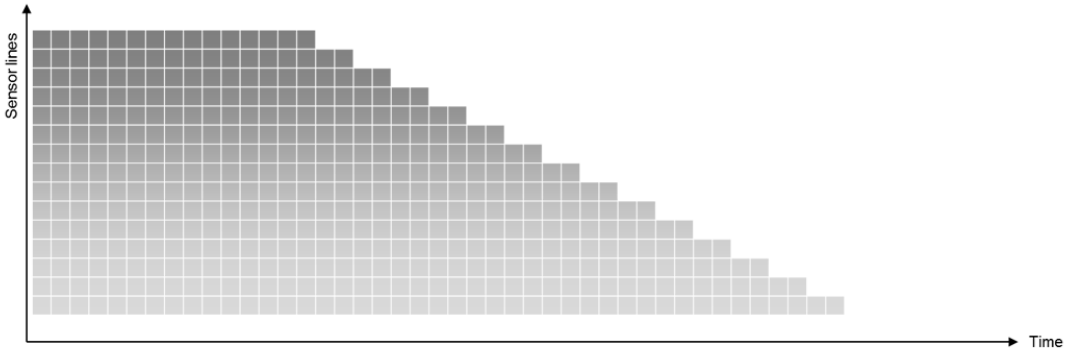


Fig. 7. Gradient jasności obrazu wynikający z różnych czasów ekspozycji dla matryc rolling shutter z funkcją globalnego resetu

Wszystkie piksele rozpoczynają ekspozycję jednocześnie, ale kończą w normalnej sekwencji odczytu linia po linii. Ostanie odczytane piksele są naświetlane najdłużej, w efekcie powstaje gradient jasności obrazu. Nadal istnieje ryzyko rozmycia obrazu podczas rejestrowania ruchomych obiektów. Można temu zaradzić, łącząc funkcję globalnego resetu, lampę błyskową i usunięcie światła otoczenia. Kontrolujemy dzięki temu dokładnie czas, w którym piksele zbierają światło.

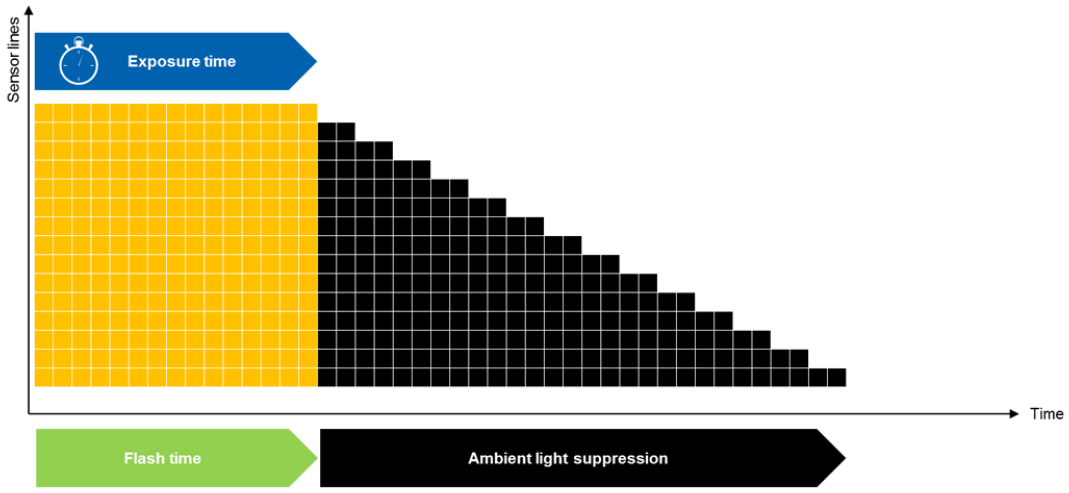


Fig. 8. Lampa błyskowa używana z czujnikami migawki toczącej się z funkcją globalnego resetu

Ilustracja przedstawia podstawową zasadę działania: lampa błyskowa jest włączona na początku ekspozycji i aktywna przez cały czas ekspozycji. Należy upewnić się, że światło otoczenia jest tłumione do momentu zakończenia ekspozycji ostatniej linii.

W ten sposób, podczas akwizycji obrazu poruszających się obiektów, można otrzymać na matrycy rolling shutter wynik taki jak z kamery global shutter.

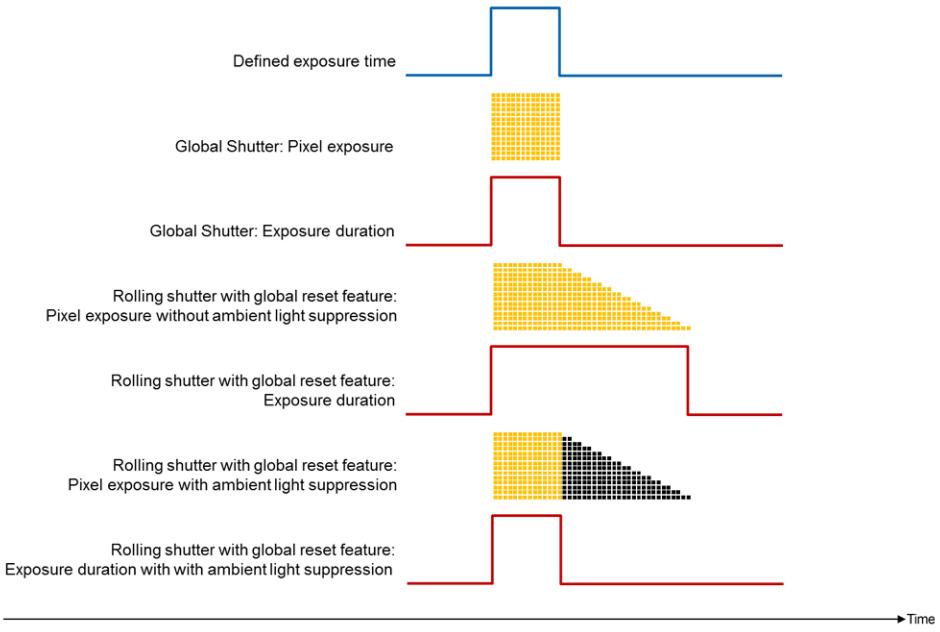


Fig. 9. Osiągnięcie ekspozycji globalnej na sensorze rolling shutter z funkcją global reset i fleszem

Zestawienie

Charakterystyka	Sensor Rolling Shutter	Sensor Global Shutter
Ekspozycja pikseli	Sekwencyjna (rząd po rzędzie / linia po linii).	Jednoczesna dla wszystkich pikseli matrycy.
Artefakty ruchowe	Obecne (Skew, Jello, pasy oświetlenia, falowanie).	Brak zniekształceń geometrycznych (czyste rozmycie).
Czułość i szum (Low-light)	Wyższa czułość, mniejszy szum (prostsza budowa piksela).	Nieco niższa czułość, wyższy szum własny.
Zakres dynamiczny (HDR)	Zazwyczaj wyższy (większa pojemność studni potencjału).	Niższy ze względu na obecność elektroniki ekranującej.
Koszt produkcji matrycy	Niski do umiarkowanego (powszechny w elektronice użytkowej).	Wysoki (skomplikowana struktura krzemowa, układy MV).
Główne obszary zastosowań	Monitoring statyczny, smartfony, kinematografia, mikroskopia.	Machine Vision, inspekcja prędkościowa, robotyka, ANPR.

Podsumowanie

- **1. Priorytet automatyki przemysłowej:** Kamery z migawką Global Shutter są bezwzględnie wymagane w systemach pozycjonowania ramion robotów, systemach rozpoznawania tablic rejestracyjnych (ANPR) przy dużych prędkościach, kontroli jakości produktów na pasach transmisyjnych oraz w systemach pomiaru geometrii 2D/3D w locie.

- **2. Optymalizacja kosztowa:** Rolling Shutter jest w zupełności wystarczający w aplikacjach, gdzie kamera i obiekt pozostają względnie statyczne, lub ruch zachodzi powoli (np. systemy kontroli dostępu, nadzór wizyjny, inspekcja statyczna żywności). Pozwala to na redukcję kosztów sprzętowych przy jednoczesnym uzyskaniu wyższej jakości kolorów i dynamiki tonalnej.

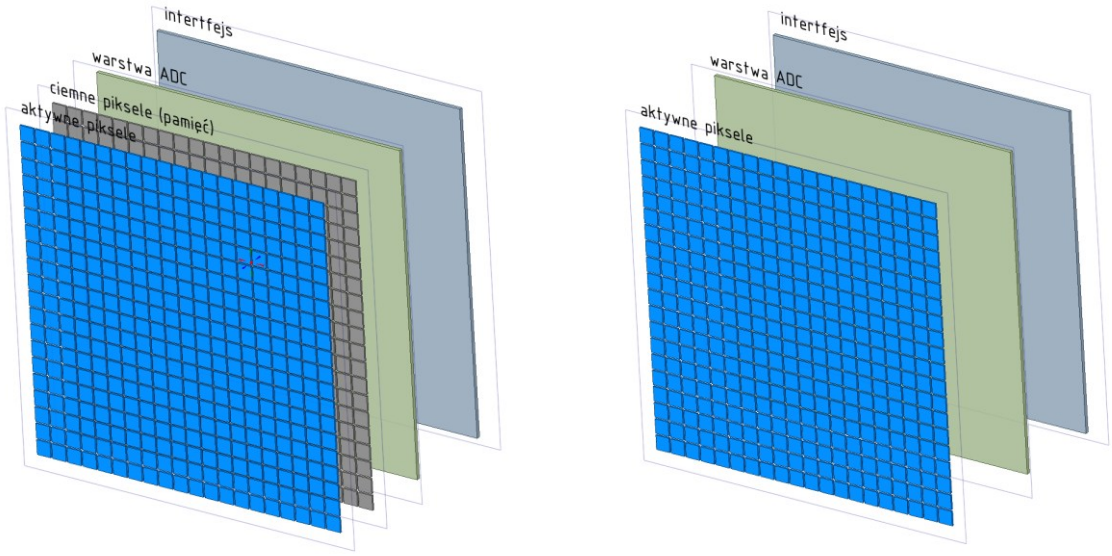
- **3. Kompensacja oświetleniem:** Jeżeli w systemie z Rolling Shutter konieczne jest zamrożenie szybkiego ruchu, częściowym rozwiązaniem jest zastosowanie zewnętrznego oświetlenia stroboskopowego (błyskowego) zsynchronizowanego z kamerą i realizowanie ekspozycji w całkowitej ciemności, co sztucznie symuluje zachowanie Global Shutter.

Opracowano z wykorzystaniem ilustracji własnych ora pochodzących z White Paper Baumer “Rolling shutter, global shutter – two principles of exposure” [AN201906]

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

Dodatek: Konstrukcja sensora i mechanizmy odczytu

Różnica między **Rolling Shutter (RS)** a **Global Shutter (GS)** sprowadza się do metody odczytu obrazu: na bieżąco linia po linii z aktywnych pikseli albo z ciemnej matrycy zakopanej pod aktywnymi pikselami, stanowiącej analogową pamięć obrazu, gdzie ładunki są przelewane w chwili zakończeniu ekspozycji. Historycznie, elektroniczne przesyłanie obrazów zaczęło się w technologii rolling shutter, lampa analizująca wysyłała sygnał analogowy proporcjonalny do chwilowej jasności, w miarę jak skanowała obraz punkt po punkcie, linia po linii.



Global shutter Rolling Shutter

Fig. 10. Schematyczna budowa matrycy global i rolling shutter

Konstrukcja matrycy

Rolling Shutter

Konstrukcja piksela (najczęściej typu **4T** – czterotranzystorowa) jest stosunkowo prosta.

- **Elementy:** Fotodioda, węzeł pływający (Floating Diffusion – FD) oraz tranzystory sterujące (resetujący, wzmacniający, transferowy i wyboru wiersza).
- **Zagospodarowanie przestrzeni:** elektronika zajmuje mało miejsca, większość powierzchni piksela stanowi fotodioda. Oznacza to na duży współczynnik **wypełnienia (fill factor)**, czyli wyższą czułość i mniejszy szum.

Global Shutter

Konstrukcja piksela (często **5T** lub więcej) jest znacznie bardziej skomplikowana.

- **Elementy:** Obok fotodiody znajduje się **dodatkowy, ekranowany element pamięciowy** (tzw. *Storage Node* lub *Storage Diode*).
- **Zagospodarowanie przestrzeni:** Dodatkowy tranzystor i komórka pamięci muszą być fizycznie odizolowane od światła (osłonięte metalową warstwą), aby zapobiec „zanieczyszczeniu" zapisanego ładunku przez padające fotony. Przez to sama fotodioda jest mniejsza, co historycznie generowało wyższy szum i mniejszą dynamikę (w nowszych matrycach BSI GS ten efekt jest jednak niwelowany).

Mechanizm konwersji i odczytu

Proces konwersji w obu sensorach przebiega według schematu:

Fotony - Elektrony (w fotodiodzie) - Napięcie (w węźle FD) - Sygnał cyfrowy (w przetworniku ADC).

Różnica tkwi w synchronizacji tego procesu.

Rolling Shutter: Odczyt sekwencyjny

W rolling shutter naświetlanie i konwersja odbywają się rządek po rządku (rzadziej kolumna po kolumnie).

1. **Naświetlanie:** Wiersz 1 zaczyna się naświetlać. Chwilę później zaczyna się naświetlać Wiersz 2, potem Wiersz 3 itd.
2. **Konwersja i Transfer:** Gdy Wiersz 1 kończy czas ekspozycji, ładunek z fotodiody trafia do węzła FD, następuje konwersja na napięcie, wzmocnienie i przesłanie do przetwornika ADC na brzegu matrycy.
3. **Efekt:** Między naświetleniem pierwszego a ostatniego wiersza mija mierzalny czas (np. kilka-kilkanaście milisekund). Jeśli obiekt szybko się porusza, w dolnych partiach matrycy będzie już w innym miejscu niż w górnych (stąd efekt *jello* / pochylenie linii pionowych).

Global Shutter: Odczyt symultaniczny z pamięcią ramki

W global shutter cała matryca pracuje w idealnej synchronizacji.

1. **Naświetlanie:** Wszystkie fotodiody na całej matrycy otwierają się i zamykają w tym samym momencie.
2. **Transfer do pamięci:** Dokładnie w momencie zakończenia ekspozycji, ładunek ze *wszystkich* fotodiod zostaje jednocześnie przeniesiony do ekranowanych komórek pamięci (*Storage Nodes*) wewnątrz pikseli. Fotodiody zostają odcięte.
3. **Konwersja i Odczyt:** Dopiero gdy obraz jest bezpiecznie „zamrożony” w pamięci pikseli, sensor zaczyna wiersz po wierszu pobierać ładunki z ciemnych pikseli, konwertować je na napięcie i wysyłać do przetworników ADC.
4. **Efekt:** Brak jakichkolwiek zniekształceń geometrycznych ruchu. Obraz jest idealnym odwzorowaniem jednego momentu.

Podsumowanie

Cecha	Rolling Shutter	Global Shutter
Architektura piksela	Prostsza (mniej tranzystorów, brak lokalnej pamięci).	Złożona (dodatkowy *Storage Node* i tranzystor odcinający).
Współczynnik wypełnienia	Wysoki (większa fotodioda = lepsza czułość).	Niższy (część piksela musi być zasłonięta ekranem).
Moment naświetlania	Sekwencyjny (wiersz po wierszu).	Jednoczesny dla całej matrycy.
Konwersja na ADC	Na bieżąco (tuż po naświetleniu danego wiersza)	Sekwencyjnie z bufora pamięci piksela.
Zniekształcenia ruchu	Występują (rolling shutter effect, jello).	Całkowity brak zniekształceń.

W uproszczeniu:

Sensor Rolling Shutter przekazuje ładunek z fotodiody na bieżąco do ADC, co wymusza przesunięcie kolejnych linii w czasie oraz przy poruszającym się obiekcie, zniekształcenie obrazu.

Sensor Global Shutter posiada za każdym pikselem ciemny kondensator, do którego przelewa zgromadzony ładunek zaraz po ekspozycji, pozwalając układowi odczytu na sekwencyjny odczyt bez ryzyka przesunięcia linii obrazu.

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