

Wykład 1

Temat: Od obiektu fizycznego do modelu cyfrowego i produktu - podstawy RE i AM

Dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz,
Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej,
Katedra Informatyki Technicznej

PROWADZĄCY

Dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz (b.ambrozkieвич@pollub.pl)

KONTAKT

Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej, Katedra Informatyki
Technicznej

Ox-128 - Sekretariat,

Ox-126A - Pokój



CELE PRZEDMIOTU

- Zdobyć wiedzę teoretycznej i praktycznej na temat technologii skanowania 3D, przetwarzania danych oraz druku 3D, a także ich praktycznego zastosowania
- Nabycie kompetencji w zakresie rekonstrukcji geometrii na podstawie chmur punktów oraz tworzenie zoptymalizowanych modeli zgodnych z wymaganiami technik przyrostowych
- Wykształcenie zdolności realizacji pełnego cyklu technologicznego: od skanowania i modelowania, przez druk 3D, po ocenę jakości i analizę wyników.

3

PLAN WYKŁADU

Wykład	Treść wykładu	Data
W1	Od obiektu fizycznego do modelu cyfrowego i produktu - podstawy RE i AM	2.03.2026
W2	Skanowanie 3D i przetwarzanie danych pomiarowych cz.1	16.03.2026
W3	Skanowanie 3D i przetwarzanie danych pomiarowych cz.2	30.03.2026
W4	Rekonstrukcja modeli CAD z chmur punktów	13.04.2026
W5	Technologie addytywne - przegląd metod	27.04.2026
W6	Projektowanie pod technologie addytywne i optymalizacja	11.05.2026
W7	Kolokwium	25.05.2026*

4

OCENA Z PRZEDMIOTU

- Ocena z wykładu (1 kolokwium na zakończenie wykładów w formie pytań otwartych lub testu),

Wymiana treści wykładowych, podgląd ocen i bieżąca komunikacja przez MS Teams.



1. Kontekst i znaczenie,
2. Inżynieria odwrotna,
3. Techniki przyrostowe,
4. Integracja RW + AM,
5. Podsumowanie



Kontekst i znaczenie

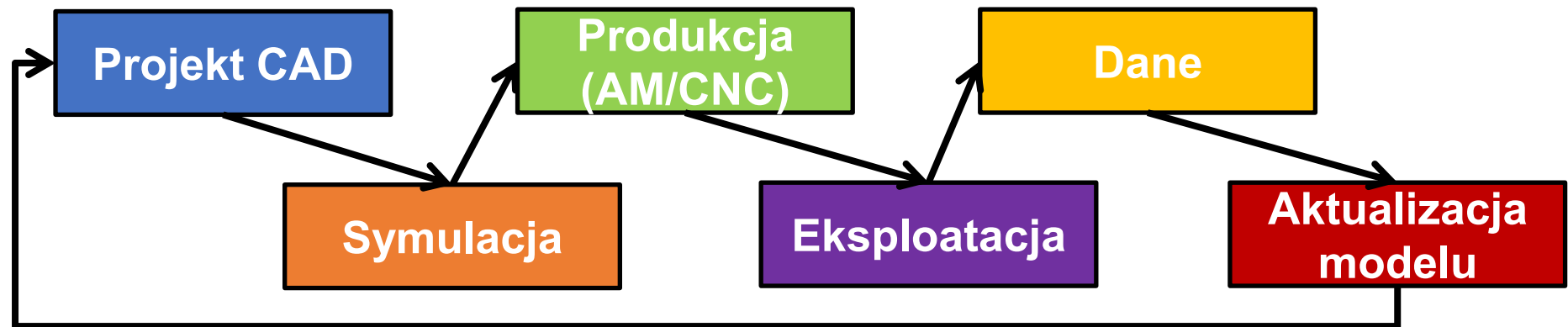


7

Dlaczego ten przedmiot?

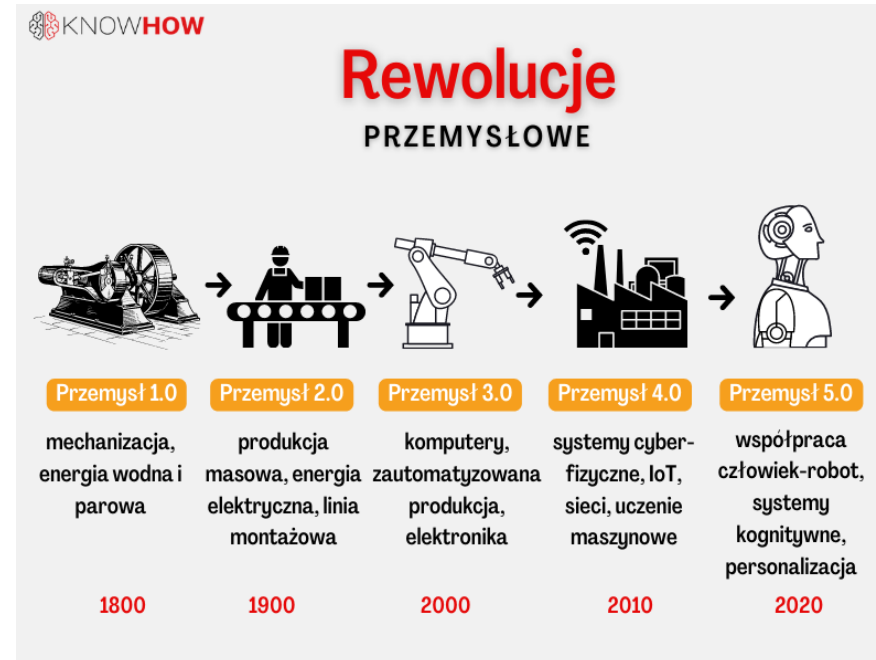
1. Transformacja cyfrowa przemysłu,
2. Przemysł 4.0/5.0
3. Cyfrowe bliźniaki
4. Remanufacturing
5. Zrównoważona produkcja

Transformacja cyfrowa przemysłu to integracja technologii cyfrowych z procesami projektowania, wytwarzania i eksploatacji w celu tworzenia inteligentnych, zintegrowanych i opartych na danych systemów produkcyjnych.



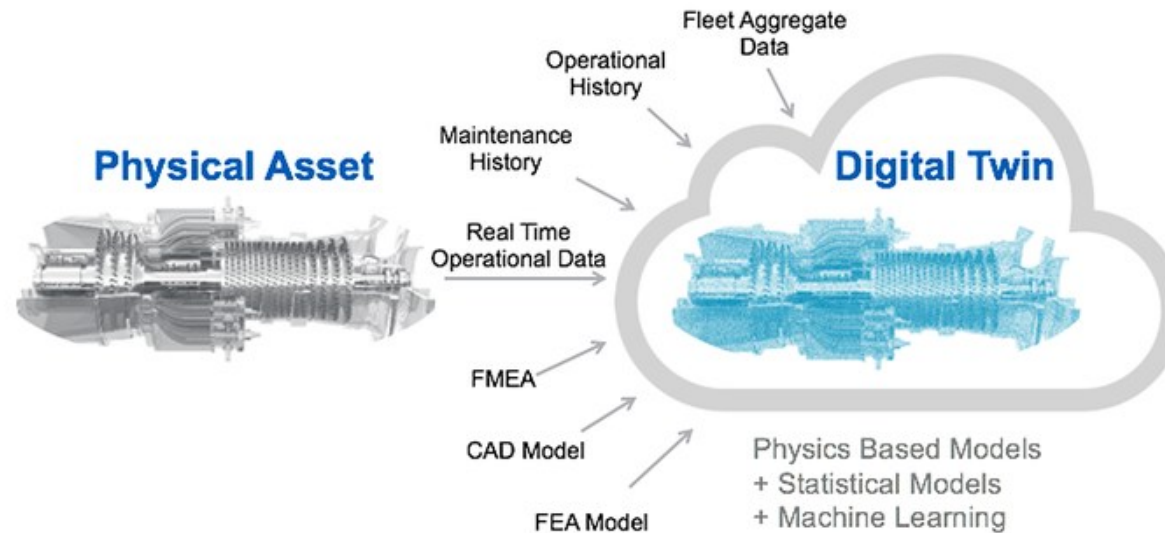
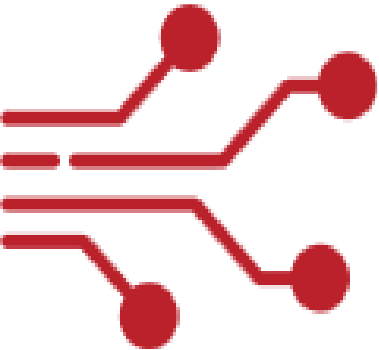
Rys.1 Konceptyjny schemat przepływu danych między projektowaniem CAD, produkcją, symulacją, eksploatacją i aktualizacją modelu.

Przemysł 4.0/5.0 - koncepcja inteligentnego przemysłu oparta na integracji systemów cyber-fizycznych, IoT, analizie danych i AI z procesami produkcyjnymi, ukierunkowana na autonomizację i optymalizację procesów (4.0) oraz współpracę człowiek-maszyna, zrównoważony rozwój i odporność systemów (5.0).



Rys.2 Ewolucja rewolucji przemysłowych od Przemysłu 1.0 do Przemysłu 5.0. [Źródło](#)

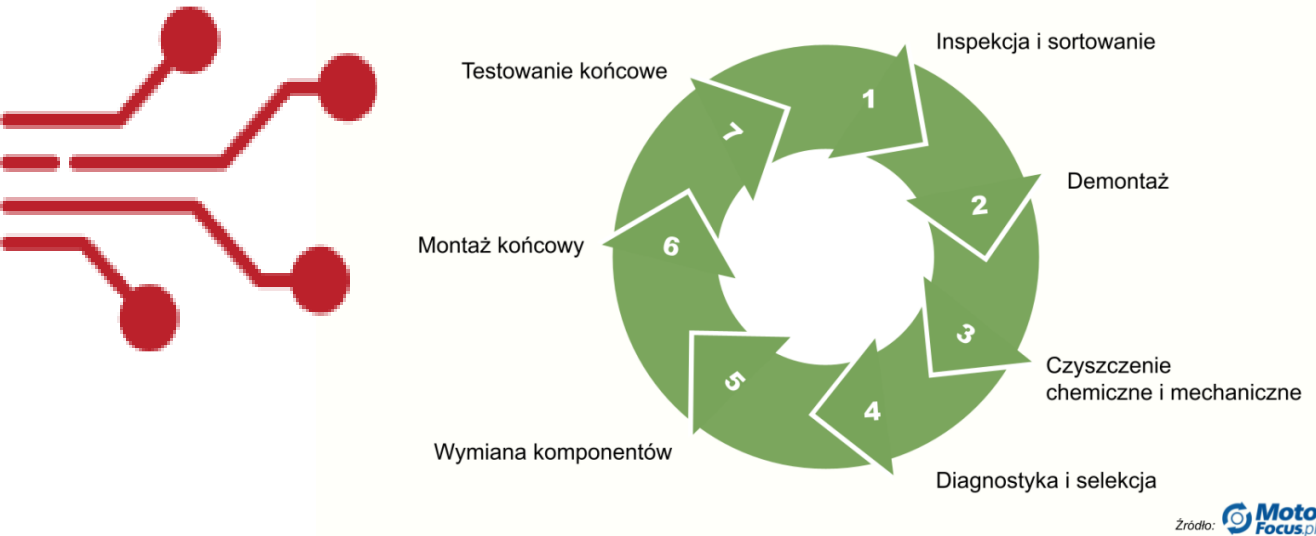
Cyfrowy bliźniak - wirtualne, dynamiczne modele fizycznych obiektów, systemów lub procesów, które są na bieżąco synchronizowane z danymi rzeczywistymi w celu monitorowania, symulacji, diagnostyki i optymalizacji ich działania.



Rys.3 Schemat powiązania obiektu fizycznego z jego cyfrowym bliźniakiem. [Źródło](#)

11

Proces remanufaktury (remanufacturing) - przemysłowy proces przywracania zużytego produktu do stanu technicznego równoważnego nowemu poprzez demontaż, weryfikację, czyszczenie, regenerację lub wymianę komponentów, ponowny montaż oraz pełne testy jakościowe zgodne ze specyfikacją producenta.



Rys.4 Etapy procesu remanufaktury w ujęciu cyklicznym. [Źródło](#)

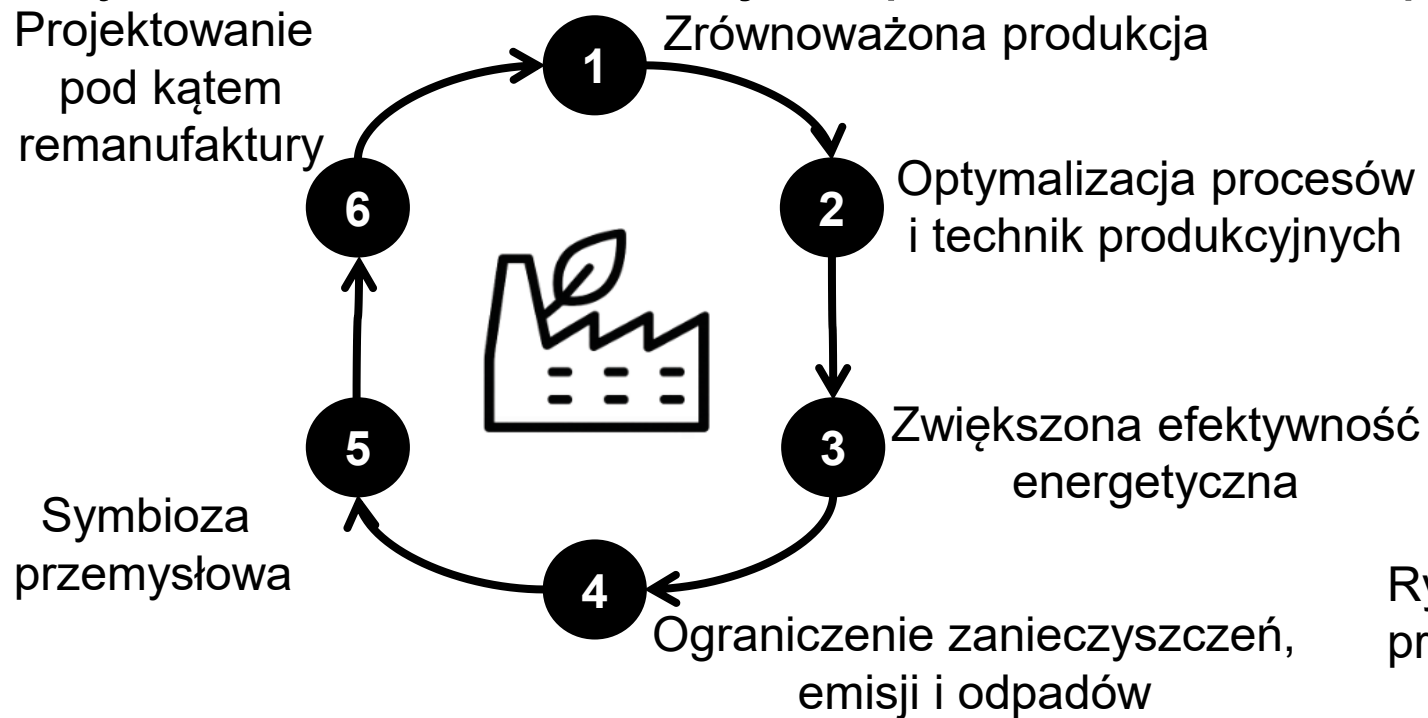
Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach:
FUNDUSZE EUROPEJSKIE DLA ROZWOJU SPOŁECZNEGO 2021-2027 (FERS)
"POLLUB z nami nowoczesne technologie" FERS.01.05-IP.08-0319/23-00



Rys.5 Porównanie silnika bazowego (core) oraz silnika po remanufakturze (reman). [Źródło](#)

12

Zrównoważona produkcja - podejście do wytwarzania dóbr, które minimalizuje zużycie zasobów i negatywny wpływ na środowisko przy jednoczesnym zapewnieniu efektywności ekonomicznej i odpowiedzialności społecznej.



Rys.7 Koncepcja zrównoważonej i inteligentnej produkcji w środowisku Przemysłu 4.0. [Źródło](#)

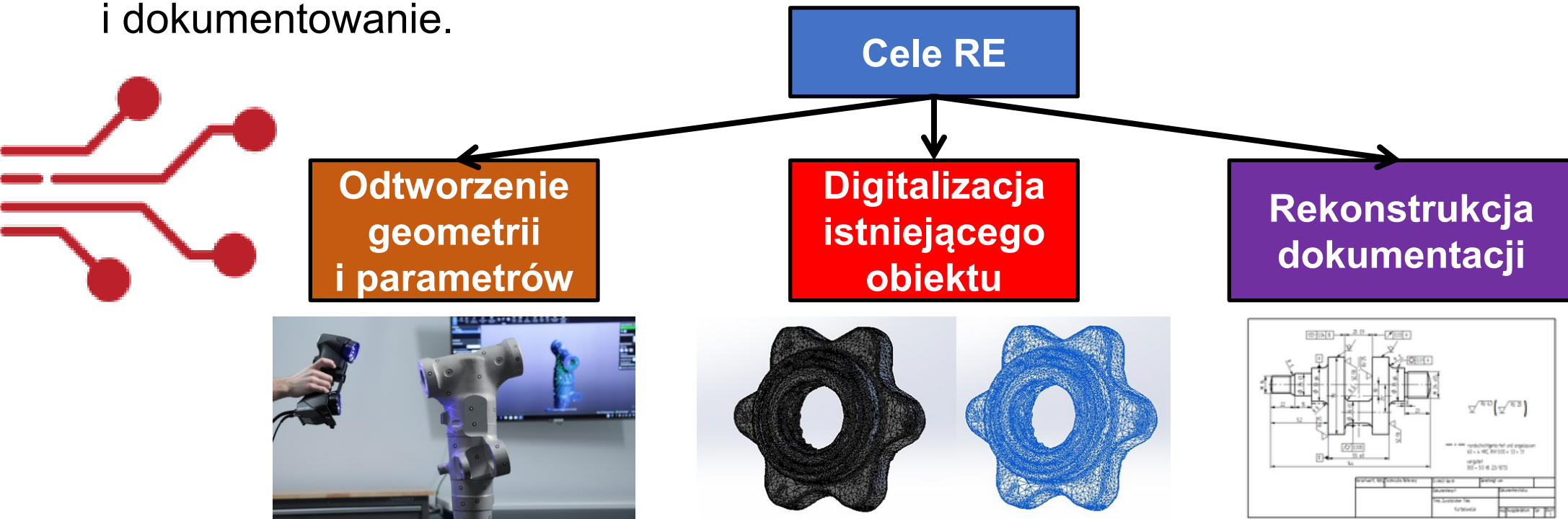
13

Rys.6 Kluczowe obszary zrównoważonej produkcji.

Inżynieria odwrotna (Reverse Engineering)



Rekonstrukcja cyfrowa obiektu to proces pozyskania, przetworzenia i odwzorowania geometrii oraz parametrów technicznych istniejącego elementu/układu w postaci modelu cyfrowego (2D/3D), umożliwiającego dalszą analizę, symulację i dokumentowanie.

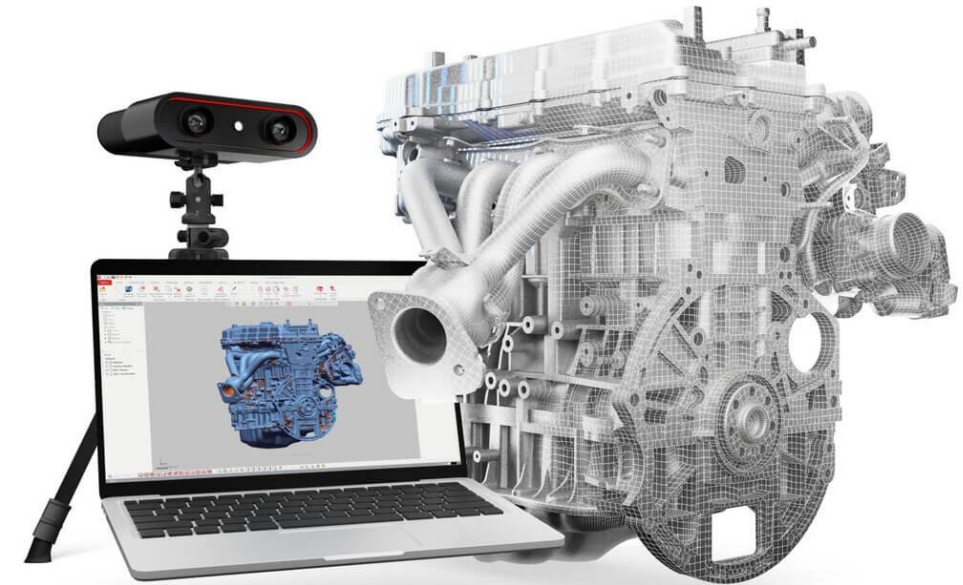


15

Rys.8 Cele inżynierii odwrotnej w procesie pozyskiwania geometrii, modeli cyfrowych i dokumentacji technicznej.

Definicja i cele

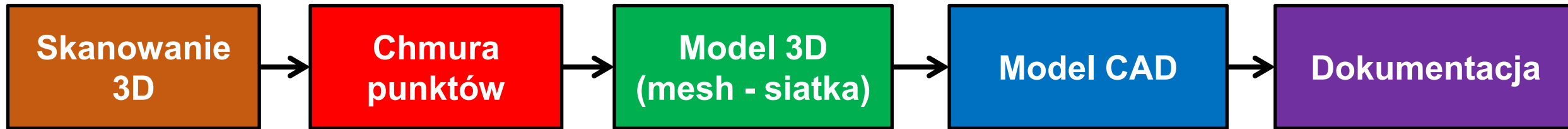
1. Odtworzenie geometrii i parametrów
 - Identyfikacja wymiarów liniowych i kątowych,
 - Odwzorowanie tolerancji i luzów montażowych,
 - Określenie właściwości materiałowych,
 - Model parametryczny (CAD).
2. Digitalizacja istniejącego obiektu
 - Skanowanie 3D,
 - Generowanie chmury punktów,
 - Konwersja do siatki i modelu bryłowego,
 - Integracja z systemem CAD/CAE.
3. Rekonstrukcja dokumentacji
 - Odtworzenie rysunków technicznych (2D)
 - Wygenerowanie dokumentacji wymiarowej,
 - Przygotowanie plików pod produkcję elementu (STEP, IGES),
 - Archiwizacja w systemie PLM.



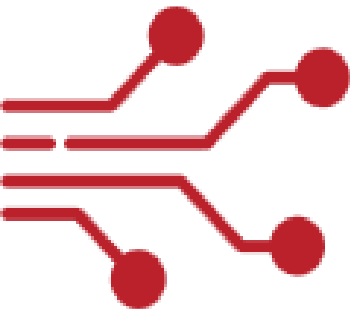
Rys.9 Integracja skanowania 3D z modelem CAD obiektu. [Źródło](#)

16

Etapy procesu



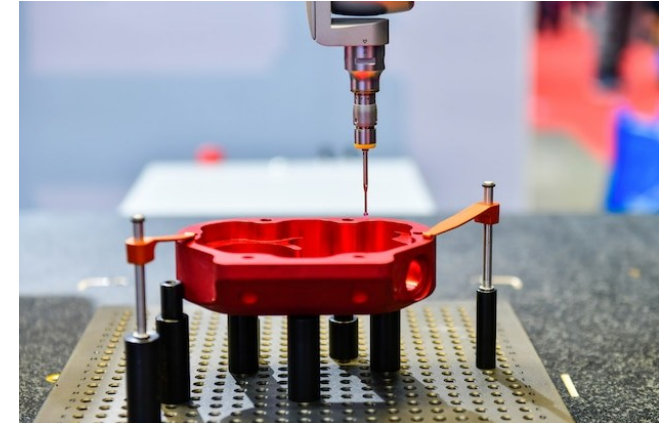
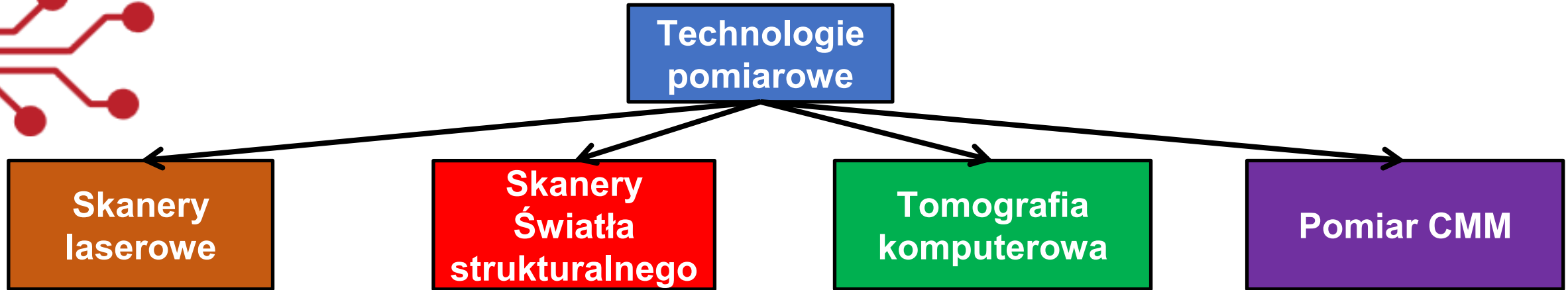
Rys.10 Główne etapy procesu inżynierii odwrotnej.



Dlaczego stosujemy inżynierię odwrotną?

- Nie posiadamy dokumentacji technicznej,  ? /  ✗
- Chcemy przeprowadzić modernizację/retrofit obiektu,  / 
- Analizujemy zużycie obiektu,  
- Odtwarzamy część zamienną,  → 
- Digitalizacja dziedzictwa technicznego.  → 

17



Rys.11 Wybrane technologie pomiarowe wykorzystywane do pozyskiwania geometrii obiektów w inżynierii odwrotnej.

Główne ograniczenia procesu digitalizacji i rekonstrukcji:

- **Szum pomiarowy** - zakłócenia danych (refleksyjność, drgania, rozdzielczość sensora) prowadzą do powstawania artefaktów w chmurze punktów,
- **Niedokładność geometrii** - niepełne dane, martwe strefy, deformacje obiektu prowadzą do znacznych odchyłek od geometrii nominalnej,
- **Rekonstrukcja powierzchni swobodnych** - trudności wynikające z aproksymacji prowadzą do utraty ciągłości i niestabilnej krzywizny.

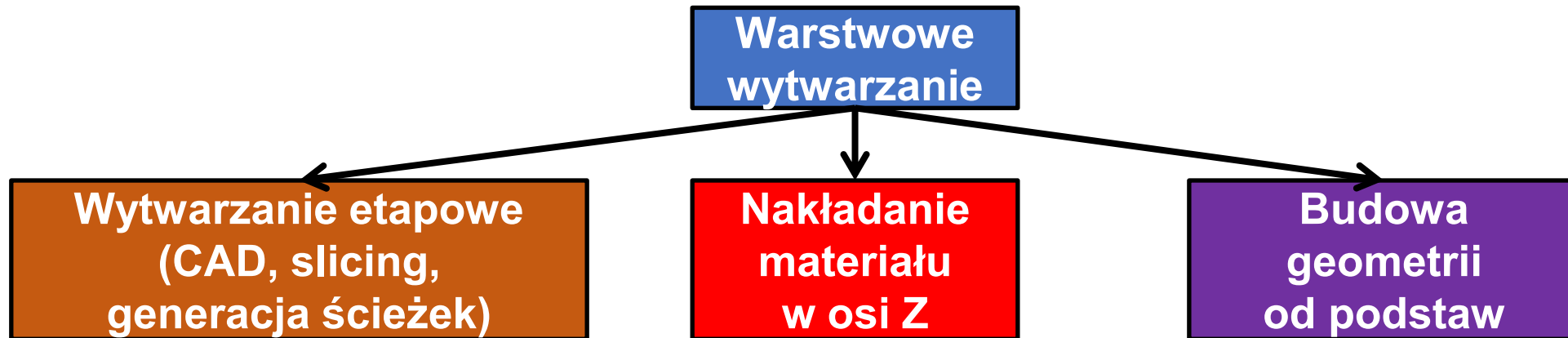


Techniki Przyrostowe (Additive Manufacturing)



20

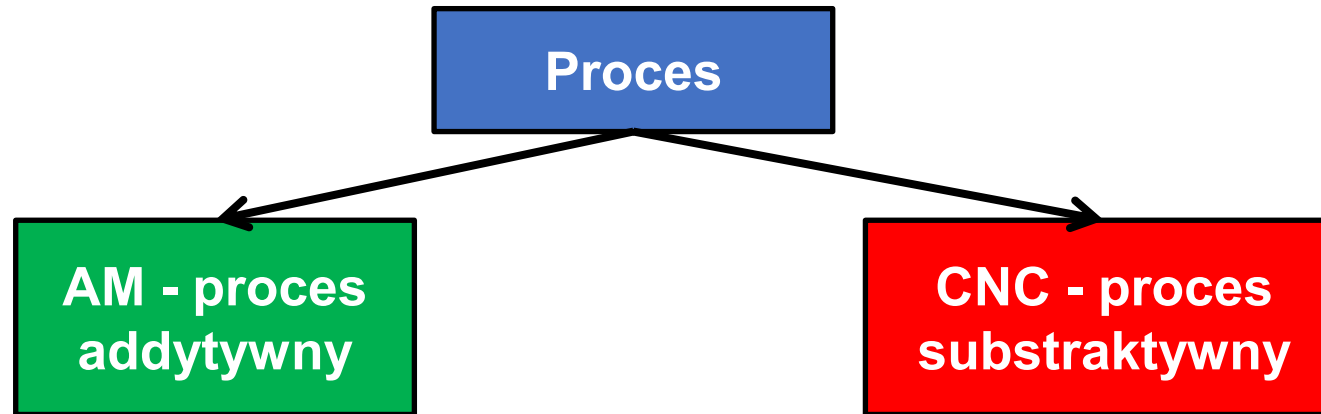
Techniki Przyrostowe/Addytywne - proces wytwarzania obiektów poprzez sekwencyjne nakładanie warstw materiału na podstawie modelu cyfrowego 3D, bez konieczności stosowania narzędzi skrawających lub form.



Rys.12 Podstawowe cechy procesu warstwowego wytwarzania w technologiach addytywnych.

AM vs CNC

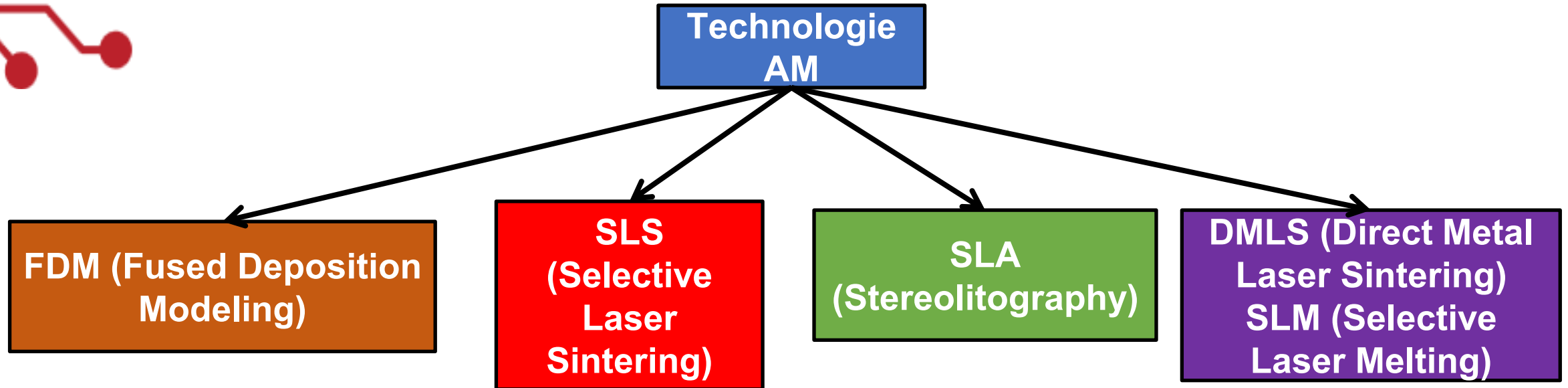
Kontrast procesowy



Rys.13 Dwa podstawowe podejścia do wytwarzania: proces addytywny (AM) i proces subtraktywny (CNC).

Tab.1 Porównanie wybranych cech technik przyrostowych i obróbki CNC.

Techniki przyrostowe	Obróbka CNC
Budowanie warstwami	Obróbka z półfabrykatu
Wysoka swoboda geometrii	Ograniczenia narzędziowe
Minimalna ilość odpadu	Wióry, straty materiałowe
Złożoność „bez kosztu formy”	Złożoność procesu - mnogość operacji



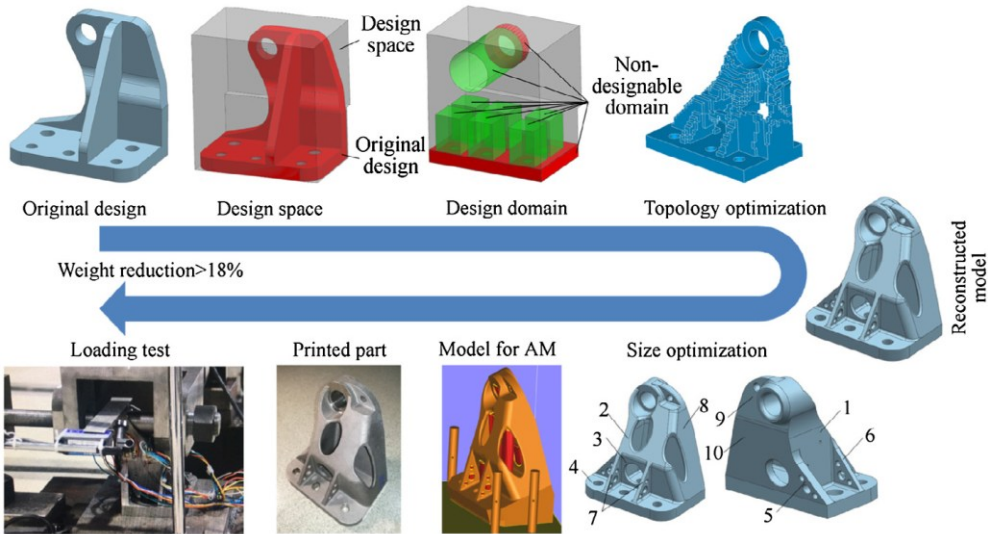
Rys.14 Klasyfikacja wybranych technologii addytywnych stosowanych do wytwarzania elementów z tworzyw i metali.

Tab.2 Zestawienie właściwości technologii AM oraz ich ograniczeń w odniesieniu do obróbki CNC.

Obszar	Zalety AM	Ograniczenia AM	Porównanie z CNC
Geometria	Kanały, integracja funkcji	Podpory, ograniczona objętość	Ograniczenia dostępu narzędzia
Personalizacja	Opłacalne dla małych serii, brak oprzyrządowania	Długi czas przy dużej serii	Wysoki koszt przygotowania
Materiały	Polimery	Anizotropia, mała certyfikacja	Izotropowe właściwości
Dokładność	Złożone detale bez montażu	Post-processing	Wyższa precyzja
Koszt	Opłacalne dla małych partii	Nieopłacalne dla dużych serii	Korzystne przy dużych seriach
Skalowalność	Prototypy, krótkie serie	Niska wydajność	Produkcja masowa

24

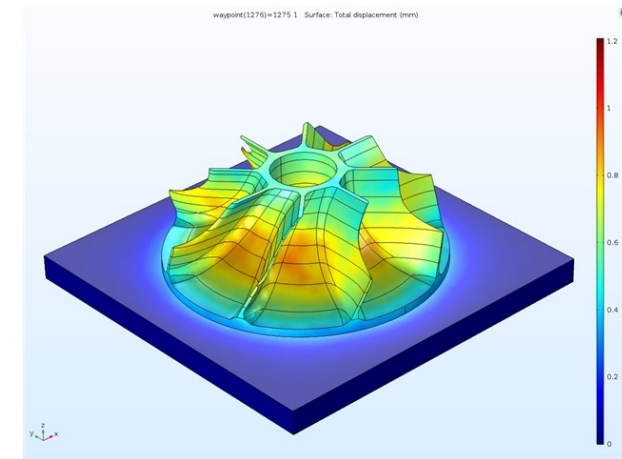
Integracja CAD i CAE umożliwia projektowanie, optymalizację oraz weryfikację komponentów w środowisku cyfrowym przed ich fizyczną realizacją.



Rys.15 Optymalizacja topologii modelu
[Źródło](#)



Rys.16 Generatywność modelu
[Źródło](#)



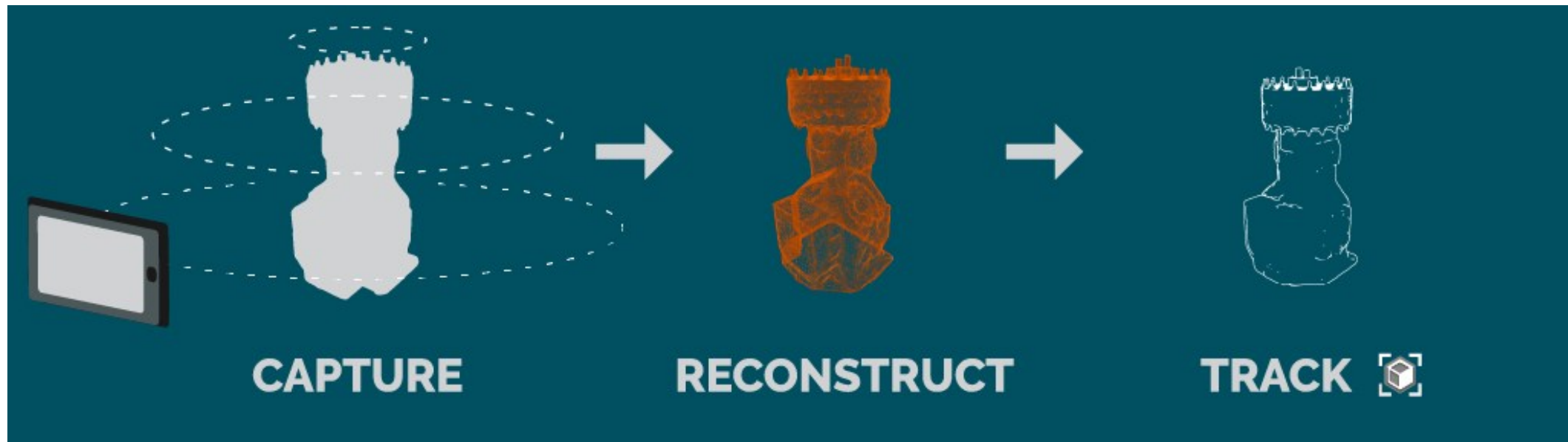
Rys.17 Symulacja procesu
[Źródło](#)

Integracja RE + AM





Rys.18 Etapy przejścia od skanowania obiektu do jego modyfikacji i wydruku 3D.



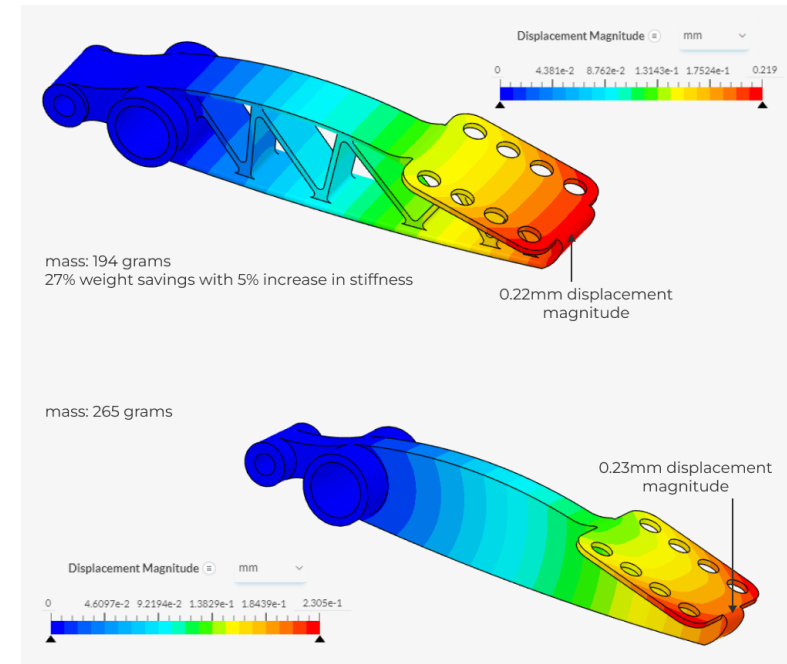
Rys.19 Schemat przejścia od skanowania obiektu do rekonstrukcji i śledzenia modelu cyfrowego. [Źródło](#)

27

- Modernizacja komponentów

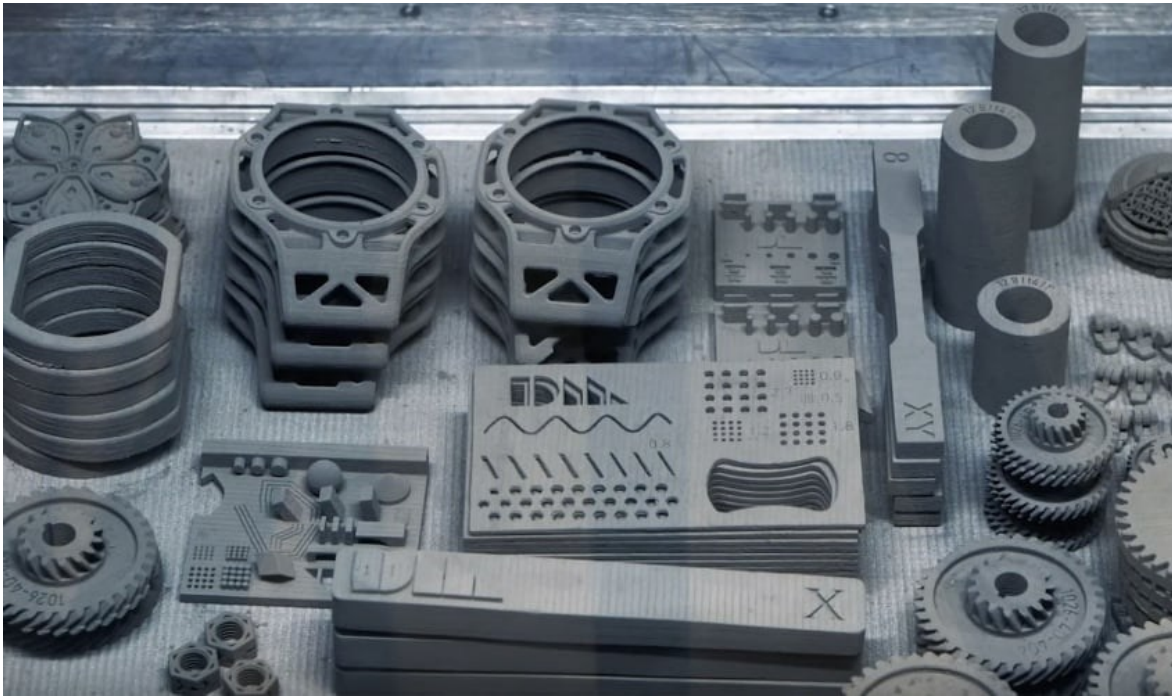


Rys.20 Wybrane przykłady geometrii uzyskanych z wykorzystaniem optymalizacji topologicznej. [Źródło](#)



Rys.21 Wpływ optymalizacji topologicznej na masę i przemieszczenia analizowanego elementu. [Źródło](#) ²⁸

- Rekonstrukcja części zamiennych



Rys.22 Przykłady detali wytwarzanych addytywnie z metalu. [Źródło](#)



Rys.23 Przykład wykorzystania druku 3D w renowacji i odtwarzaniu elementów pojazdów. [Źródło](#)

29

- Proces remanufaktury (remanufacturing)



Rys.24 Reprodukacja wirnika z zastosowaniem technologii addytywnej. [Źródło](#)



Rys.25 Ocena i porównanie elementów w procesie kontroli jakości po wytwarzaniu. [Źródło](#)

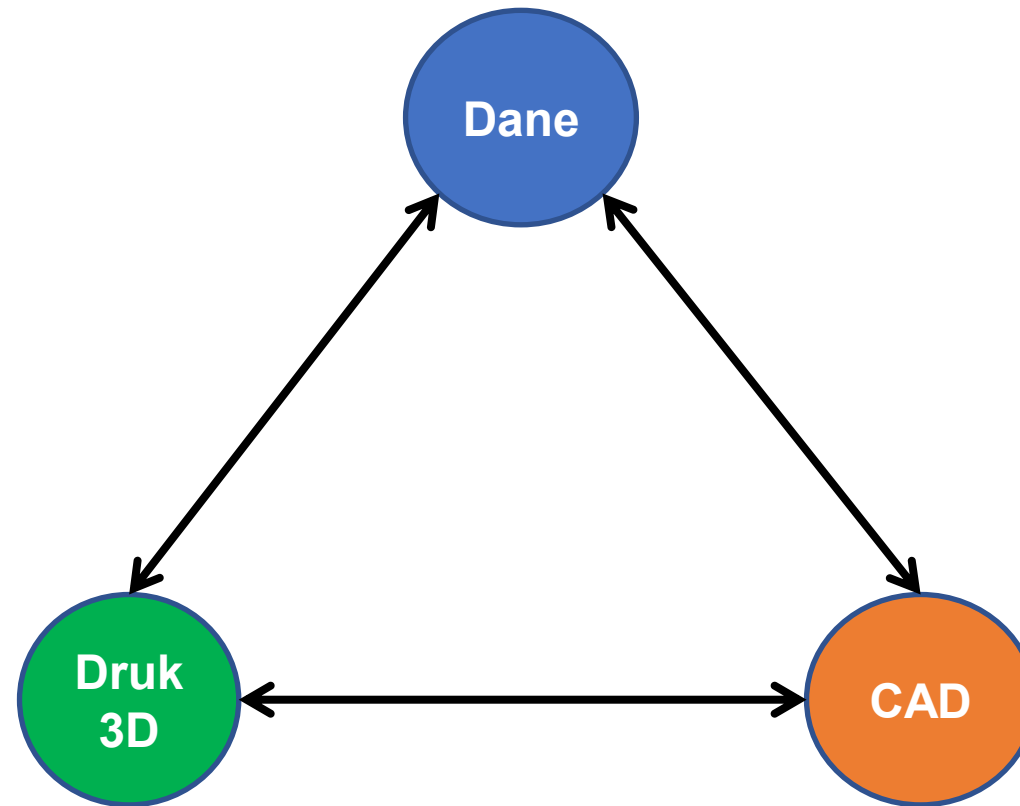
30



Podsumowanie



31



Rys.26 Podstawowe elementy cyfrowego procesu przygotowania modelu do druku 3D.

- **Dane pomiarowe** stanowią fundament nowoczesnego projektowania i produkcji.
- **Integracja RE, CAD/CAE i AM** tworzy spójny cyfrowy łańcuch rozwoju produktu.
- **Model cyfrowy** umożliwia optymalizację przed fizycznym wytworzeniem komponentu.
- **Technologie addytywne** zwiększają elastyczność i skracają czas wdrożenia.
- **Zastosowanie cyfrowego bliźniaka** pozwala na aktualizację modelu w oparciu o dane eksploatacyjne.

1. AI w projektowaniu
2. Automatyczna rekonstrukcja geometrii
3. Zrównoważone systemy produkcyjne



Rys.27 Integracja projektowania CAD z wytwarzaniem addytywnym złożonych struktur geometrycznych. [Źródło](#)



Rys.29 Koncepcja zrównoważonej produkcji i gospodarki o obiegu zamkniętym w środowisku przemysłowym. [Źródło](#)

Dziękuję za uwagę

Wykład 2

Temat: Skanowanie 3D i przetwarzanie danych pomiarowych

Dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz,
Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej,
Katedra Informatyki Technicznej

1. Błędy i niepewność pomiarowa
2. Klasyfikacja metod skanowania
3. Parametry jakości danych
4. Schemat przetwarzania
5. Metody rekonstrukcji geometrii



37

Błędy i niepewność pomiarowa



38

Skanowanie 3D – proces bezkontaktowej akwizycji danych geometrycznych obiektu, polegający na wyznaczeniu zbioru punktów w przestrzeni trójwymiarowej $\mathbb{R}^3$, które opisują jego powierzchnię:

$$P = \{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$$

gdzie: (x_i, y_i, z_i) - współrzędne punktu pomiarowego,

N – liczba punktów w chmurze,

P – chmura punktów reprezentująca geometrię obiektu.

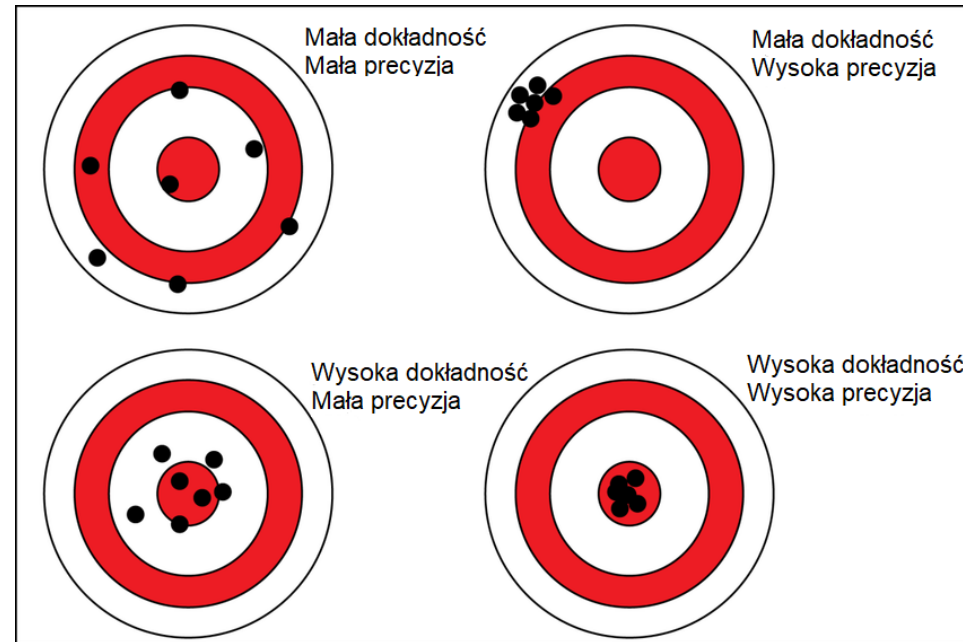


Rys.1 Chmura punktów budynku i otoczenia. [Źródło](#)



Rozdzielczość vs. dokładność

Rozdzielczość przestrzenna - minimalna odległość między punktami pomiarowymi (gęstość próbkowania),
Dokładność bezwzględna - odchylenie wyniku od wartości rzeczywistej,



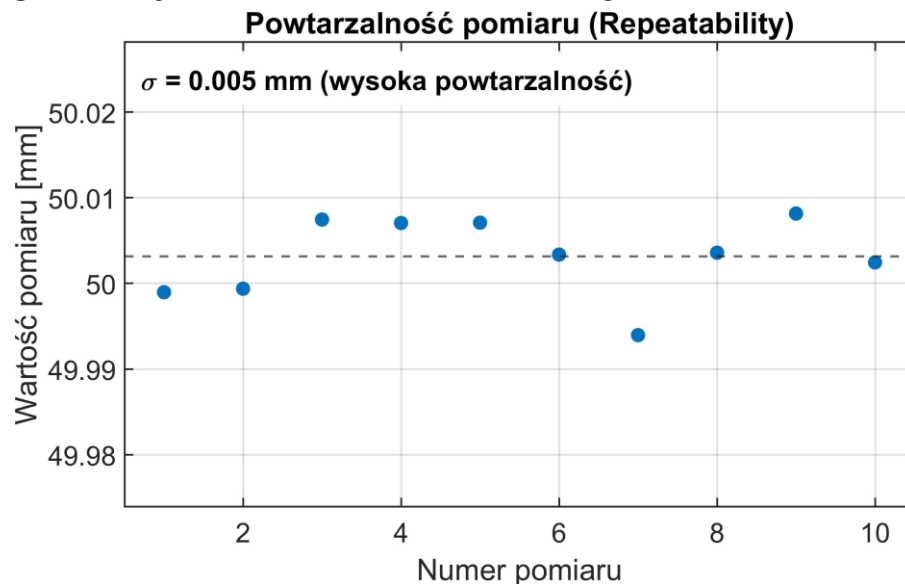
Rys.2 Ilustracja dokładności i precyzji wyników. [Źródło](#)

40



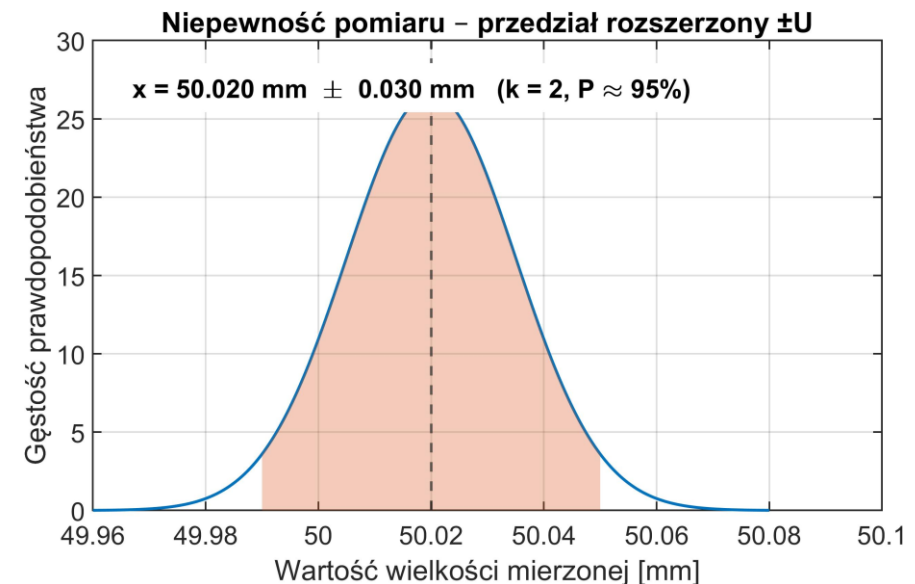
Powtarzalność - zdolność systemu do uzyskiwania zbliżonych wyników przy wielokrotnym pomiarze.

Niepewność pomiaru - przedział, w którym z określonym prawdopodobieństwem znajduje się wartość rzeczywista.



Rys.3 Zależność wyników pomiaru od kolejnych powtórzeń

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach:
FUNDUSZE EUROPEJSKIE DLA ROZWOJU SPOŁECZNEGO 2021-2027 (FERS)
"POLLUB z nami nowoczesne technologie" FERS.01.05-IP.08-0319/23-00



Rys.4 Rozkład prawdopodobieństwa wartości mierzonej wielkości z uwzględnieniem niepewności

41



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

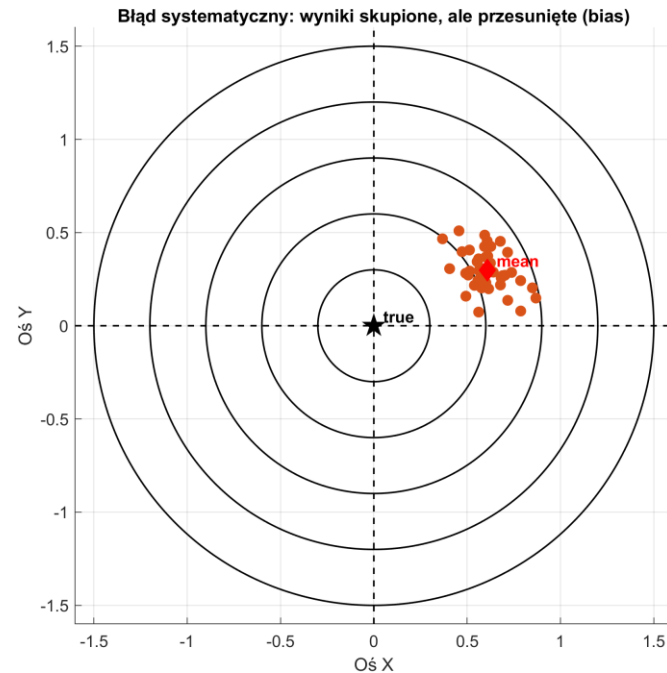


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Błąd systematyczny - stałe lub przewidywalne odchylenie wyniku od wartości rzeczywistej, wynikające z metody, przyrządu lub warunków.

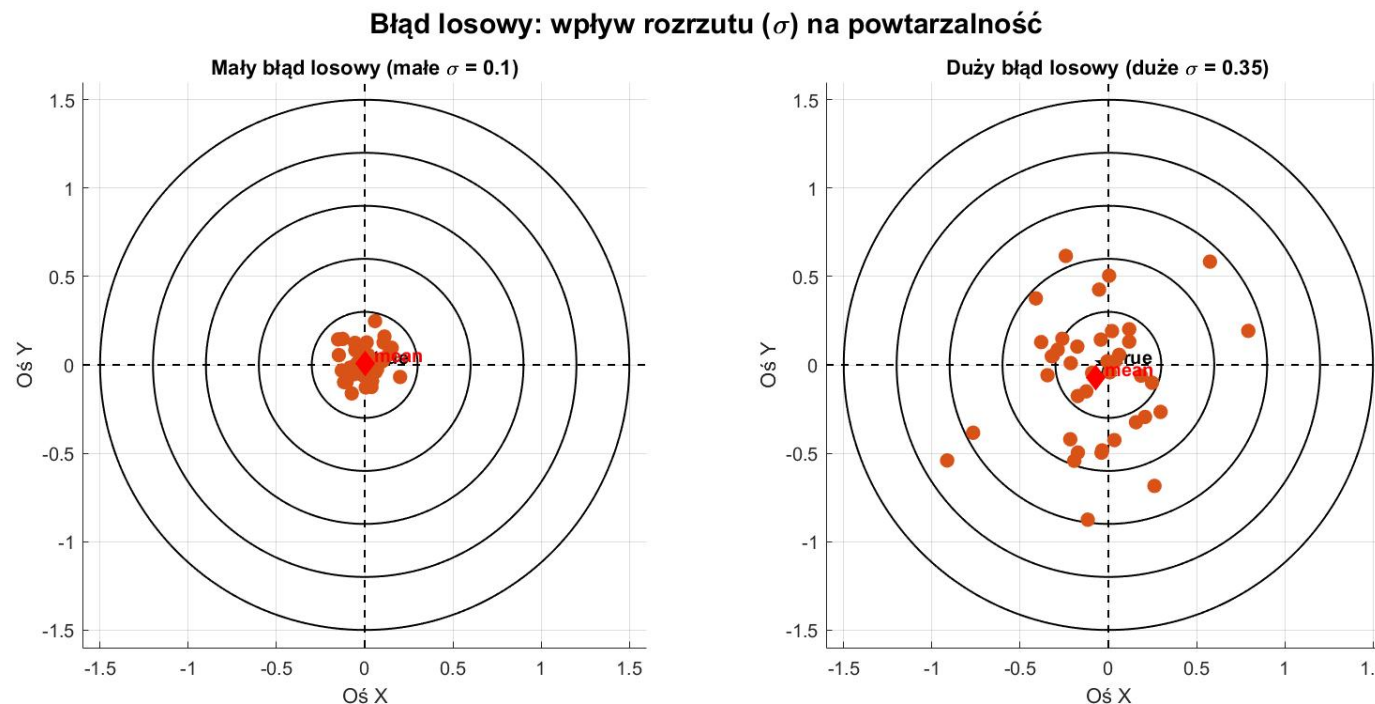


Rys.5 Przesunięcie wyników względem wartości rzeczywistej wskutek błędu systematycznego

42



Błąd losowy - składnik zmienności wyników, zmieniający się w sposób nieprzewidywalny między powtórzeniami.

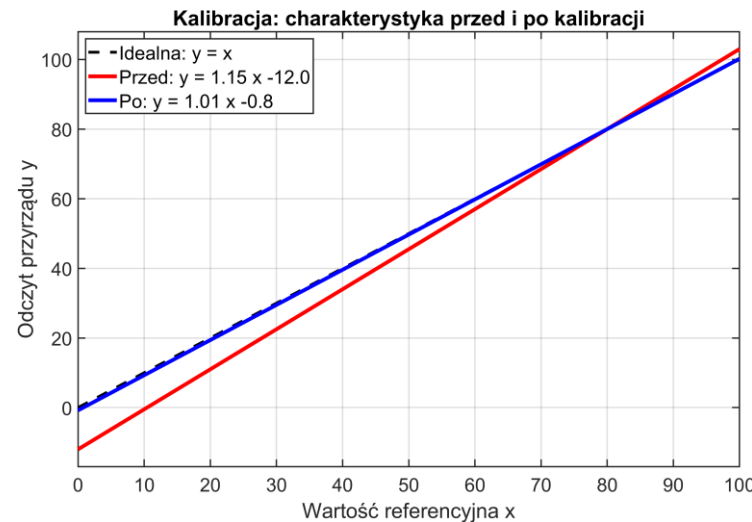


Rys.6 Wpływ błędu losowego na rozrzut i powtarzalność wyników pomiaru

Kalibracja - zestaw działań polegających na porównaniu wskazań przyrządu z wzorcem odniesienia w celu wyznaczenia poprawek i/lub charakterystyki błędu.



Rys.7 Etapy procesu korekcji wyniku pomiaru



Rys.8 Zależność odczytu przyrządu od wartości referencyjnej przed i po kalibracji

Niepewność pomiarowa - parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać mierzonej wielkości.

Niepewność standardowa (rozrzut statystyczny):

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

gdzie: u_A - niepewność typu A (statystyczna),
 u_B - niepewność typu B (specyfikacja systemu).

Niepewność rozszerzona (przedział 95%):

$$U = k * u_C$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia (najczęściej $k=2$ dla 95%)

45



Składniki niepewności całkowitej:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_{kalibracja}^2 + u_{geometria}^2}$$

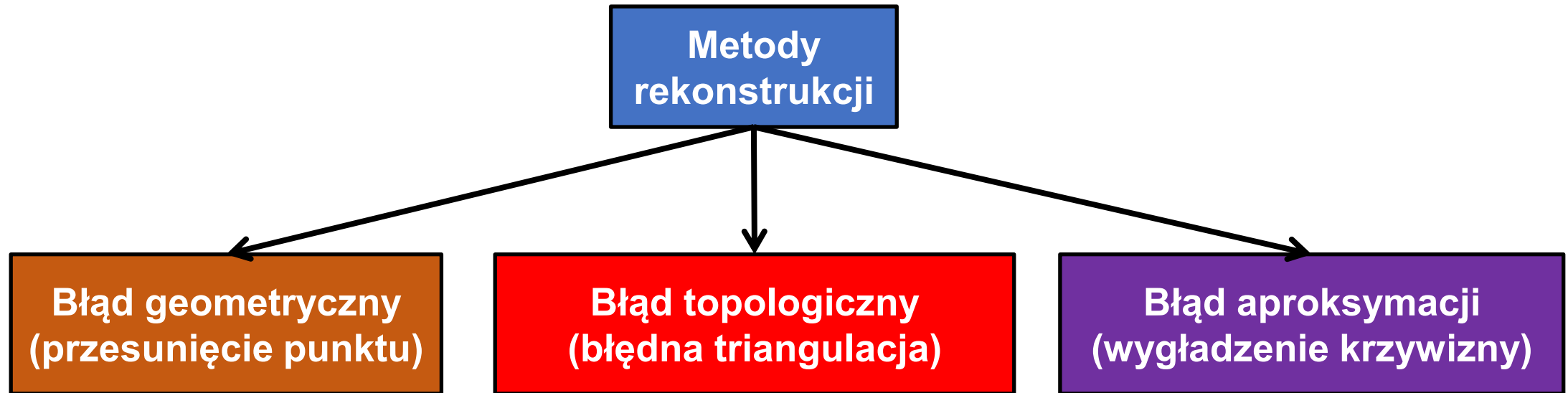
Zapis formalny wyniku pomiaru:

$$X = \bar{x} \pm U$$

gdzie: $\bar{x}$ - estymata wartości mierzonej (średnia wyniku), U - niepewność rozszerzona.



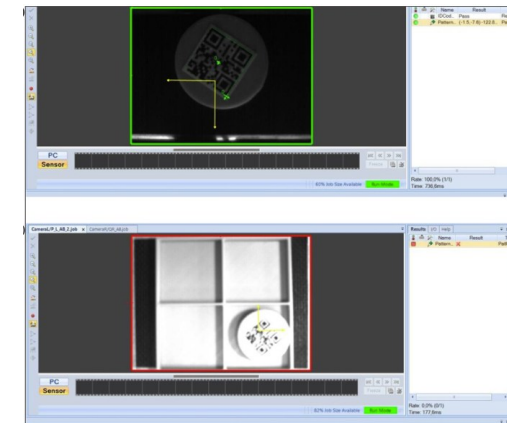
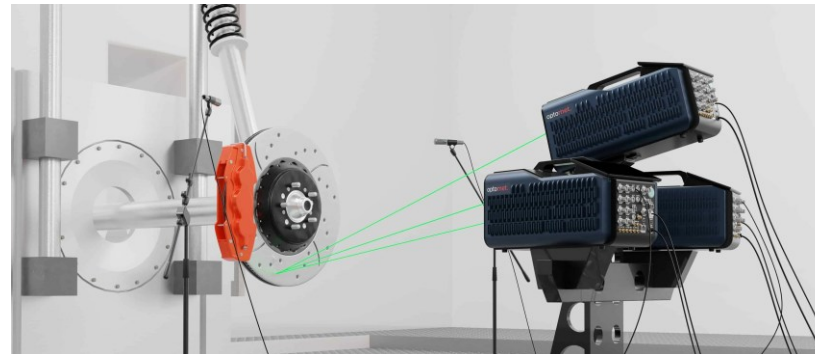
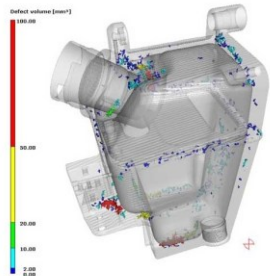
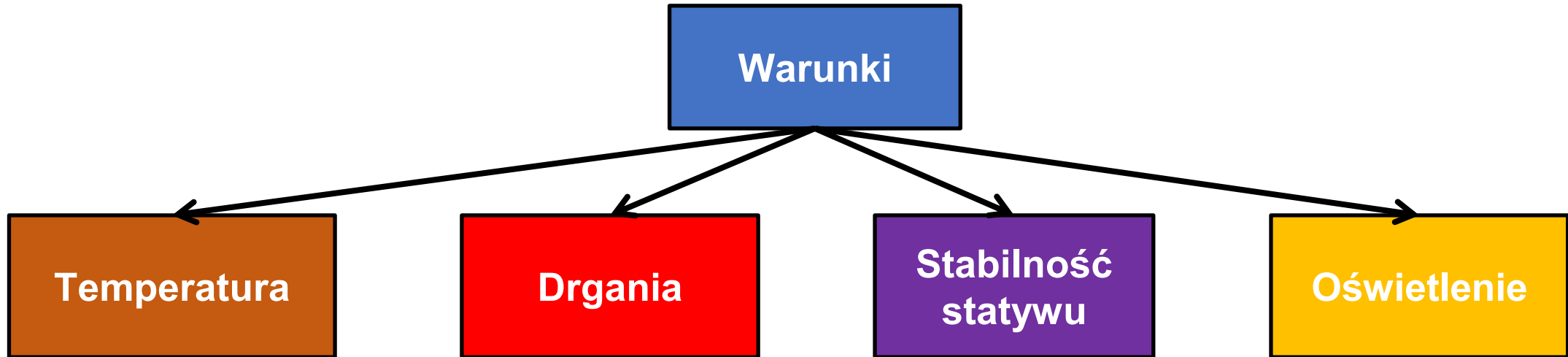
Błąd geometryczny oraz Błąd topologiczny



Rys.9 Błędy geometryczne, topologiczne i aproksymacji w rekonstrukcji 3D



Wpływ warunków środowiskowych



Rys.10 Wpływ warunków otoczenia i stanowiska na jakość rekonstrukcji

Klasyfikacja metod skanowania



49

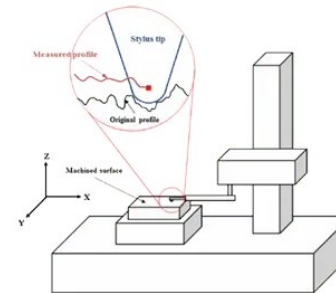
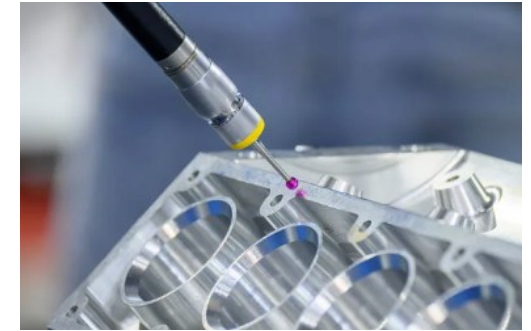
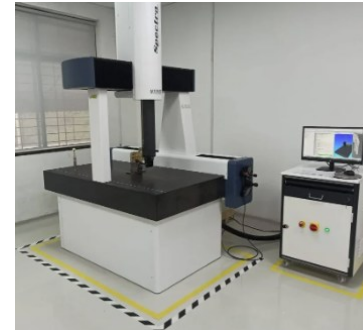
Metody kontaktowe - pomiar realizowany poprzez fizyczny kontakt elementu pomiarowego z powierzchnią obiektu.

Cechy:

- Wysoka dokładność punktowa,
- Mała prędkość akwizycji,
- Ryzyko deformacji miękkich materiałów,
- Pomiar sekwencyjny (punkt po punkcie).

Przykłady:

- Maszyna współrzędnościowa (CMM),
- Profilometr stykowy,
- Czujniki zegarowe.



Rys.11 Urządzenia i techniki pomiarów stykowych. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#)



Maszyna współrzędnościowa - układ pomiarowy wyznaczający współrzędne punktów (x,y,z) na powierzchni obiektu w przestrzeni $\mathbb{R}^3$.

Cechy:

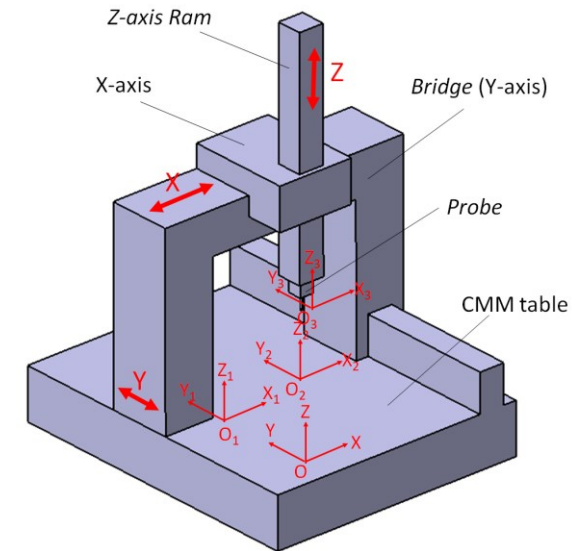
- Układ osiowy XYZ,
- Głowica pomiarowa,
- Sonda z kulką rubinową,
- Układy kompensacji temperatury.

Parametry metrologiczne:

- Dokładność rzędu $1-5\mu\text{m}$,
- Powtarzalność: wysoka (małe σ),
- Zakres pomiarowy: od małych detali do dużych korpusów,



Rys.12 Współrzędnościowa maszyna pomiarowa podczas pomiaru detalu. [Źródło](#)



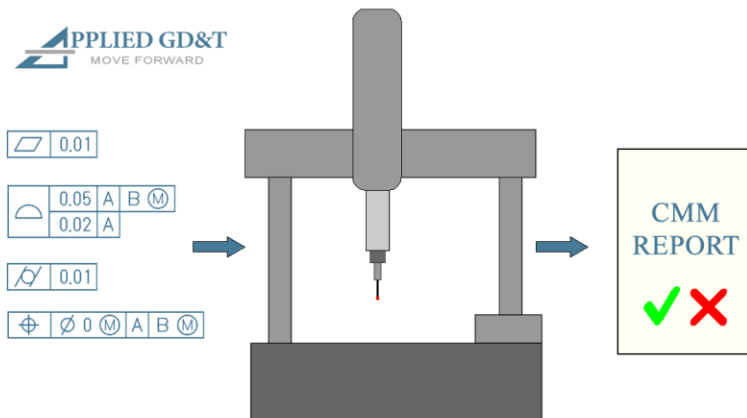
Rys.13 Schemat budowy i układu osi współrzędnościowej maszyny pomiarowej. [Źródło](#) ⁵¹



Maszyna współrzędnościowa

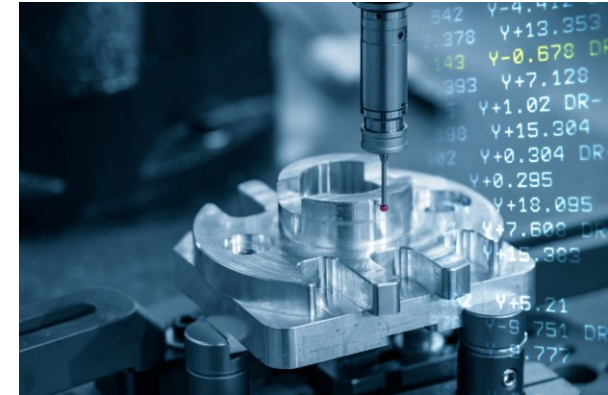
Zastosowania:

- Kontrola jakości w produkcji precyzyjnej,
- Inspekcja części maszyn (np. bloki silników, korpusy),
- Weryfikacja tolerancji geometrycznych (GD&T),
- Kalibracja i wzorcowanie detali,
- Wsparcie inżynierii odwrotnej.



Rys.14 Współrzędnościowa maszyna
pomiarowa podczas pomiaru detalu [Źródło](#)

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach:
FUNDUSZE EUROPEJSKIE DLA ROZWOJU SPOŁECZNEGO 2021-2027 (FERS)
"POLLUB z nami nowoczesne technologie" FERS.01.05-IP.08-0319/23-00



Rys.15 Pomiar detalu na współrzędnościowej
maszynie pomiarowej [Źródło](#)



Rys.16 Głowica pomiarowa z końcówką stykową [Źródło](#)

52



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



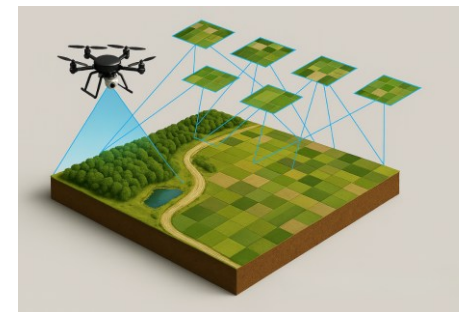
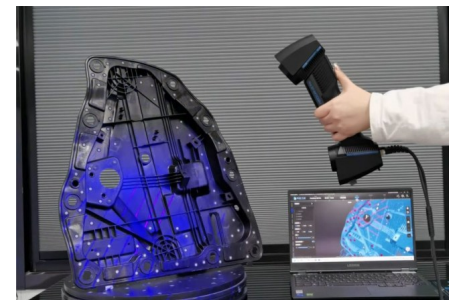
Metody bezkontaktowe - pomiar realizowany bez fizycznego kontaktu z obiektem, zazwyczaj z wykorzystaniem promieniowania optycznego lub fal elektromagnetycznych.

Cechy:

- Szybka akwizycja danych,
- Generowanie chmur punktów,
- Brak wpływu mechanicznego na obiekt,
- Zależność od warunków oświetlenia/odbicia.

Przykłady:

- Skanery laserowe,
- Skanery światła strukturalnego,
- Fotogrametria,
- Tomografia CT.



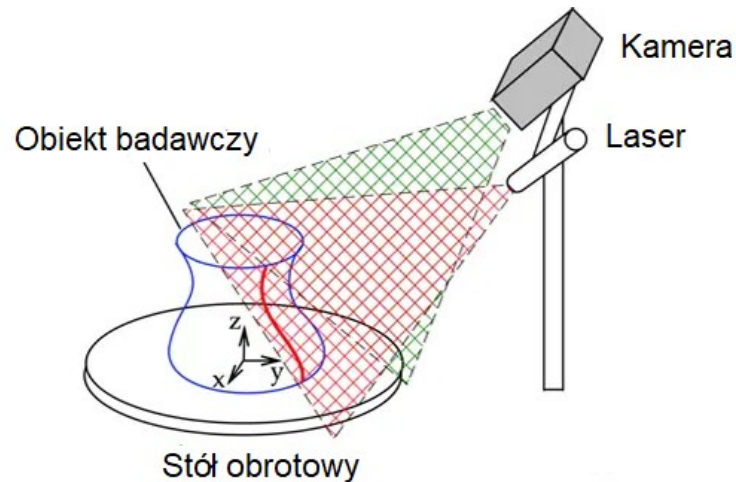
Rys.17 Przykłady nowoczesnych systemów pomiarowych i obrazowania stosowanych w inżynierii, diagnostyce oraz monitoringu przestrzennym.

Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#)



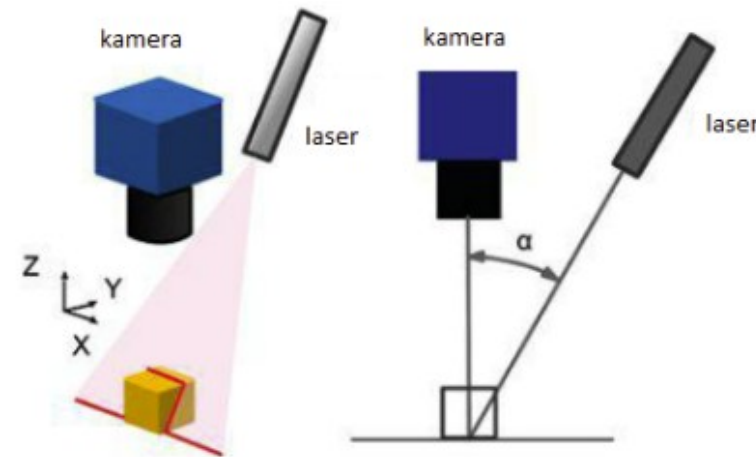
Skannery laserowe (triangulacja)

Zasada działania skanerów laserowych opiera się na metodzie triangulacji. Źródło laserowe rzutuje na powierzchnię obiektu punkt lub linię świetlną, natomiast kamera rejestruje położenie odbitego promienia pod znanym kątem obserwacji. Na podstawie zależności geometrycznych w układzie emiter-obiekt-detektor wyznaczana jest odległość, a w konsekwencji współrzędne przestrzenne punktów powierzchni.



Rys.18 Schemat działania optycznego systemu skanowania 3D z wykorzystaniem lasera i kamery. [Źródło](#)

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach:
FUNDUSZE EUROPEJSKIE DLA ROZWOJU SPOŁECZNEGO 2021-2027 (FERS)
"POLLUB z nami nowoczesne technologie" FERS.01.05-IP.08-0319/23-00



Rys.19 Zasada triangulacyjnego pomiaru odległości z wykorzystaniem kamery i lasera. [Źródło](#)

54



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



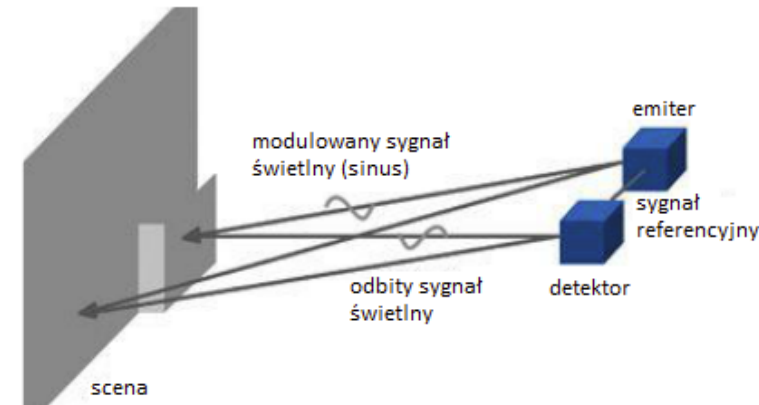
Metoda Time of Flight (ToF) to bezkontaktowa technika pomiaru odległości, w której dystans do obiektu wyznacza się na podstawie czasu przelotu impulsu elektromagnetycznego (najczęściej laserowego) między nadajnikiem a detektorem. Odległość obliczana jest ze wzoru:

$$d = \frac{c * t}{2}$$

gdzie: d – odległość od obiektu, c – prędkość światła, t – zmierzony czas przelotu impulsu.



Rys.20 Mapa głębi rejestrowana przez kamerę ToF. [Źródło](#)



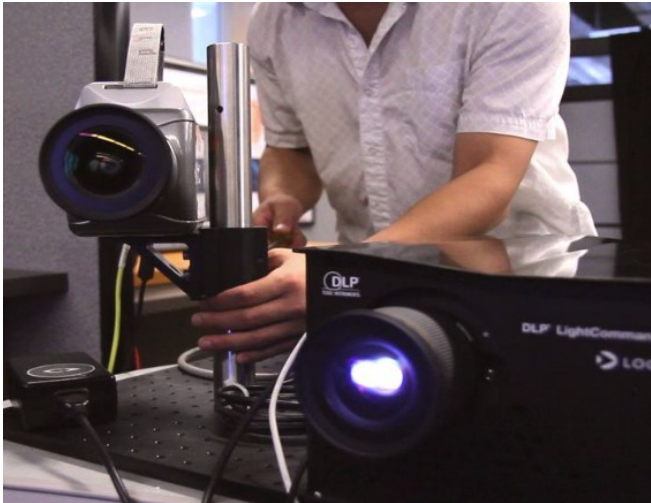
Rys.21 Zasada działania kamery Time-of-Flight. [Źródło](#)

55

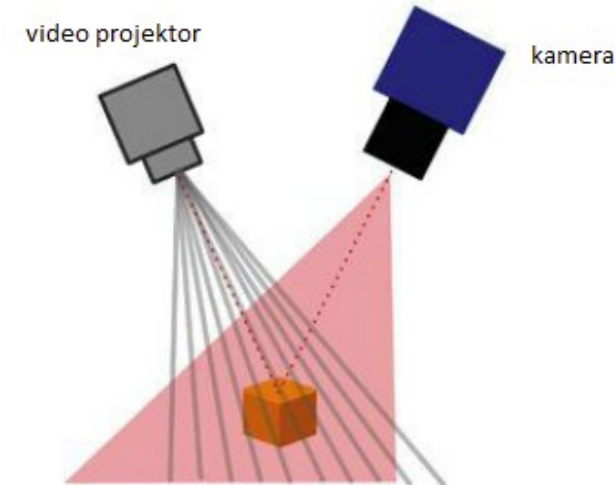


Skanery laserowe (Metoda projekcji prążków)

Metoda projekcji prążków (metoda światła strukturalnego) to bezkontaktowa technika skanowania 3D, w której na powierzchnię obiektu rzutowany jest wzór prążków (najczęściej sinusoidalnych), a ich deformacja rejestrowana przez kamerę służy do wyznaczenia geometrii przestrzennej obiektu.



Rys.22 Stanowisko pomiarowe skanera światła strukturalnego. [Źródło](#)



Rys.23 Zasada działania kamery Time-of-Flight. [Źródło](#)

56

Fotogrametria to technika rekonstrukcji geometrii 3D obiektu na podstawie analizy wielu zdjęć wykonanych z różnych punktów widzenia.

Wykonanie serii
zdjęć
z zachowaniem
pokrycia (60-80%)

Detekcja punktów
charakterystycznych
(feature points)

Dopasowanie
homologicznych
punktów między
obrazami

Triangulacja
wyznaczenie
współrzędnych 3D

Rys.24 Etapy rekonstrukcji 3D na podstawie serii obrazów cyfrowych.



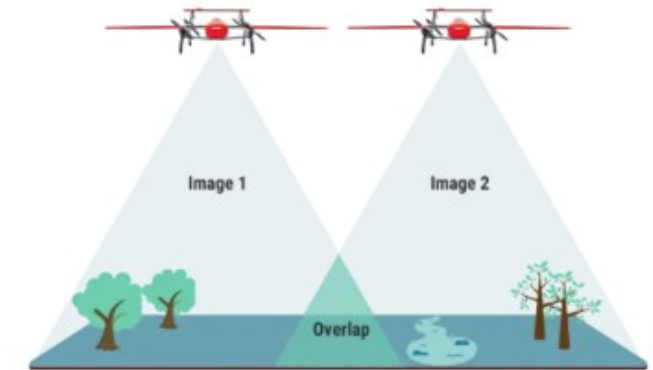
Fotogrametria

Charakterystyka metody:

- Metoda bez projekcji światła,
- Wymaga dobrej tekstury powierzchni,
- Zależna od jakości i kalibracji kamery,
- Dokładność: mm-cm (zależnie od skali),
- Skalowalna - od małych obiektów do krajobrazów

Zastosowania:

- Dokumentacja zabytków,
- Geodezja i kartografia,
- Archeologia,
- Modelowanie terenu,
- Inżynieria odwrotna.

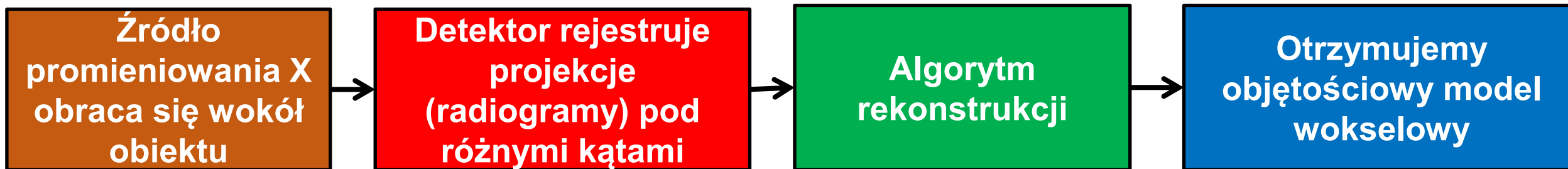


Rys.25 Fotogrametria jako metoda rekonstrukcji geometrii 3D obiektów i terenu na podstawie serii zachodzących na siebie obrazów. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

58



Tomografia komputerowa to technika obrazowania 3D oparta na analizie osłabienia promieniowania rentgenowskiego przechodzącego przez obiekt, umożliwiającą rekonstrukcję jego geometrii wewnętrznej i zewnętrznej.



Rys.26 Etapy rekonstrukcji tomograficznej prowadzącej do uzyskania trójwymiarowego modelu wokselowego obiektu.

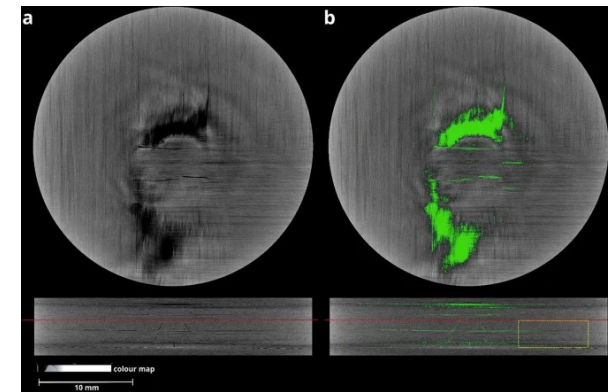
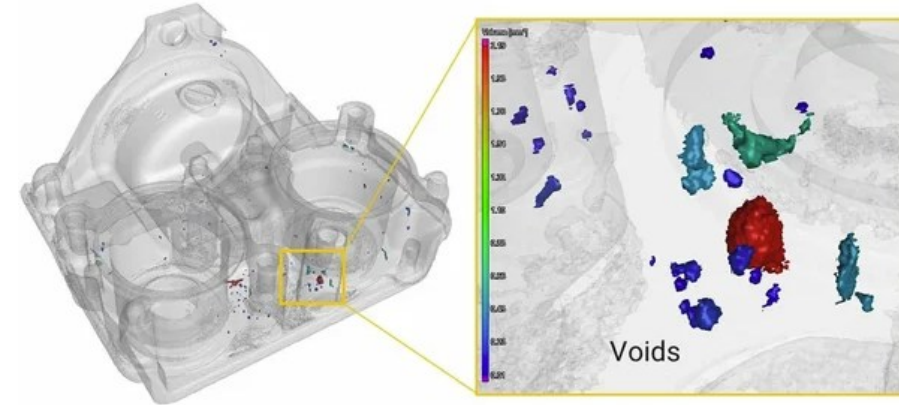


Charakterystyka metody:

- Rozdzielczość: μm (mikro-CT),
- Model objętościowy (voxele),
- Możliwość eksportu do STL,
- Wysoki koszt aparatury,
- Ograniczenia przy materiałach o dużej gęstości.

Co możemy analizować:

- Pęknięcia i wtrącenia,
- Porowatość odlewów,
- Nieciągłości materiałowe,
- Geometrię kanałów wewnętrznych,
- Struktury kratowe,



Rys.27 Przykład identyfikacji i wizualizacji nieciągłości wewnętrznych w danych tomografii komputerowej.

Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)



Parametry jakości danych



61

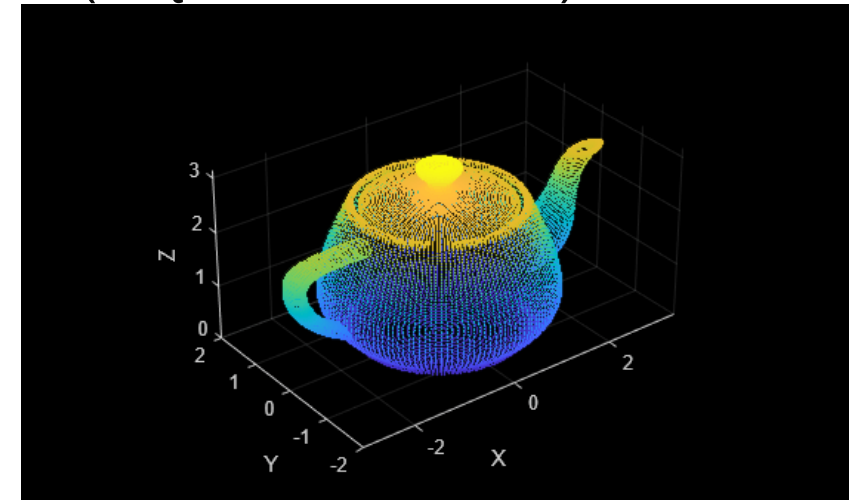
Chmura punktów (point cloud) to dyskretny zbiór punktów w przestrzeni $\mathbb{R}^3$, reprezentujący powierzchnię obiektu:

$$P = \{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$$

gdzie: x_i, y_i, z_i - współrzędne punktu, N – liczba punktów (często $10^5 - 10^8$).

Charakter danych:

- Brak topologii (brak połączeń między punktami),
- Reprezentacja geometryczna, nie parametryczna,
- Dane surowe (wymagają filtracji i przetwarzania).

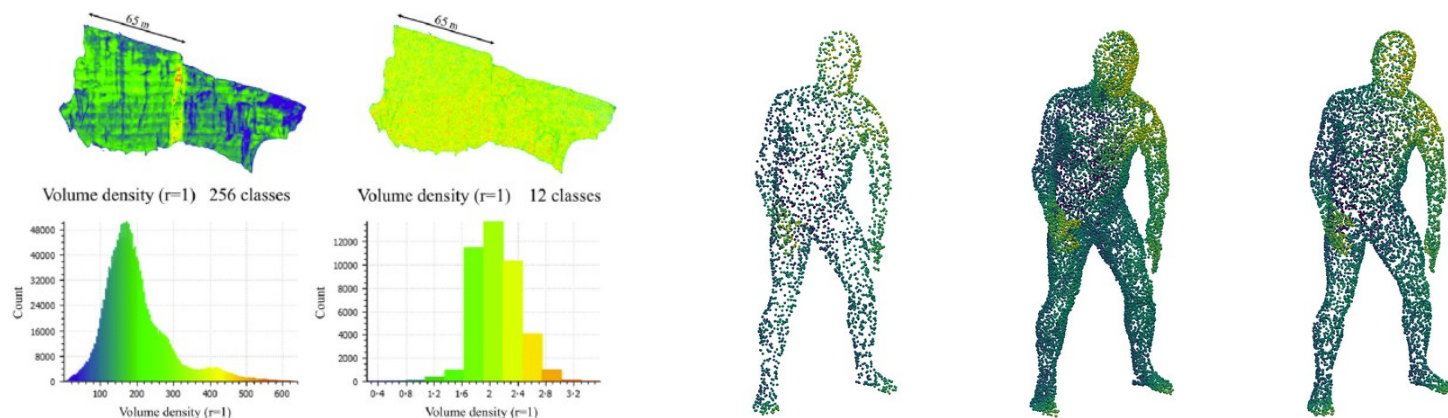


Rys.28 Chmura punktów przedstawiająca trójwymiarową geometrię obiektu. [Źródło](#)



Właściwości geometryczne:

- Gęstość punktów (liczba punktów na jednostkę powierzchni, zależna od rozdzielczości skanera),
- Rozdzielczość przestrzenna (minimalna odległość między punktami),
- Dokładność pomiarowa (zależna od zastosowanej metody),
- Redundancja danych (duża liczba punktów prowadzi do uzyskania plików o dużych rozmiarach).



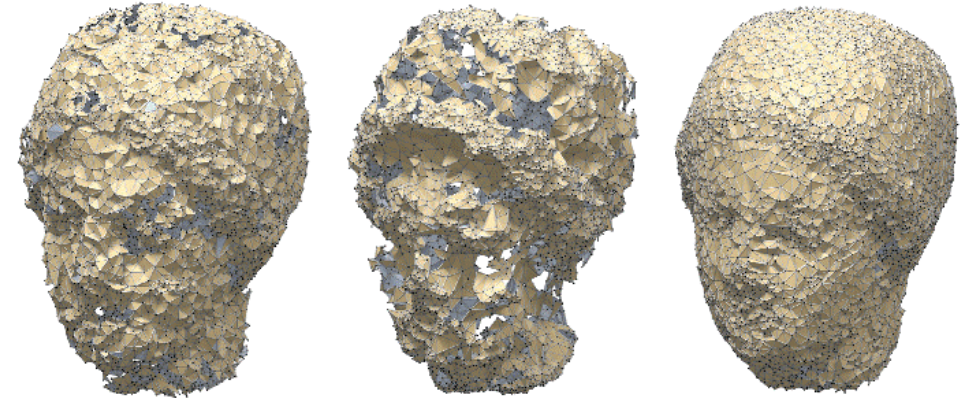
Rys.29 Przykłady analizy i klasyfikacji chmur punktów na podstawie wybranych cech geometrycznych.

63

Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

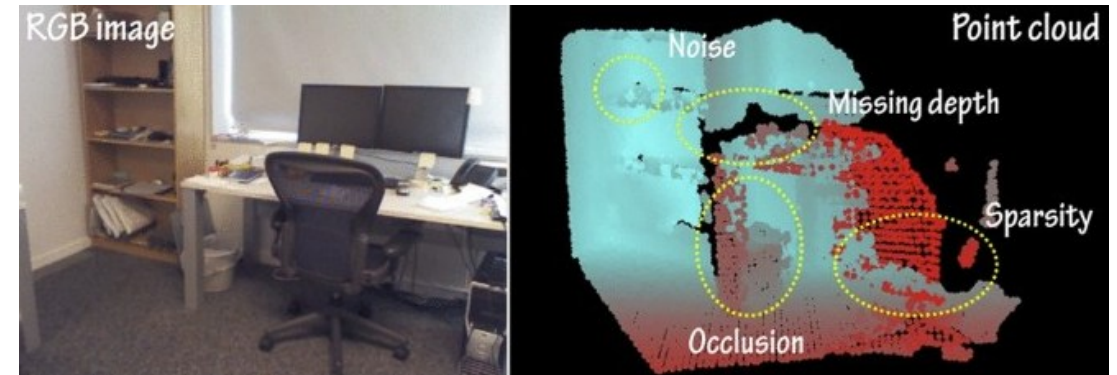
Typowe problemy:

- Szum pomiarowy,
- Brakujące fragmenty,
- Nadmiarowe punkty,
- Niejednorodna gęstość,
- Konieczność rejestracji wielu skanów.



Operacje przetwarzania:

- Filtracja (statistical outlier removal),
- Segmentacja,
- Wygładzanie,
- Rekonstrukcja siatki (mesh generation),
- Aproxymacja powierzchni (NURBS).



Rys.30 Przykłady zakłóceń, braków danych i rekonstrukcji powierzchni w przetwarzaniu chmur punktów.

Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

64



RMS (Root Mean Square Error) to miara średniej wartości błędu geometrycznego wyznaczona jako pierwiastek z średniej arytmetycznej kwadratów odchyleń punktów od modelu referencyjnego. Jest to miara średniokwadratowego odchylenia punktów od modelu referencyjnego (CAD), powierzchni aproksymowanej lub danych wzorcowych.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2}$$

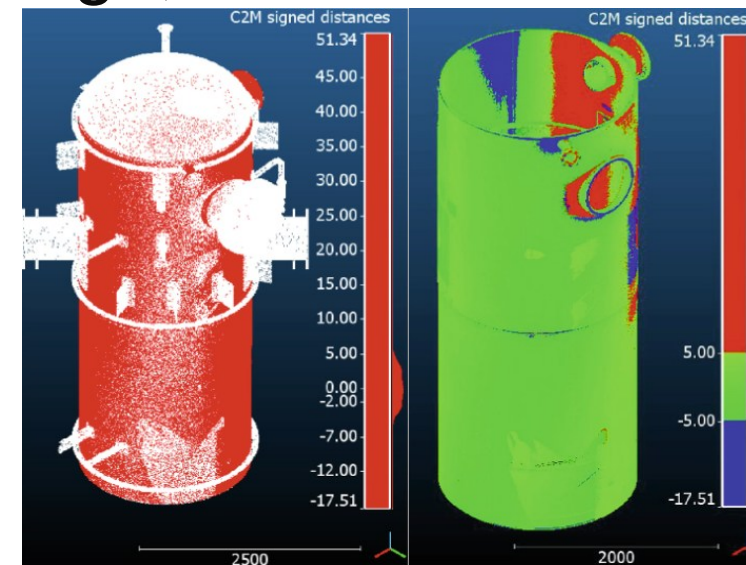
Gdzie: d_i - odległość i-tego punktu od powierzchni referencyjnej, N - liczba punktów.

- Małe RMS oznacza wysoką zgodność geometryczną,
- Duże RMS oznacza większe odchylenia/błędy pomiarowe.



Zastosowanie RMS:

- Walidacja skanu względem modelu CAD,
- Ocena dokładności systemu pomiarowego,
- Kontrola jakości rekonstrukcji 3D.



Rys.31 Mapa odchyłek geometrycznych między chmurą punktów a modelem odniesienia. [Źródło](#)

66

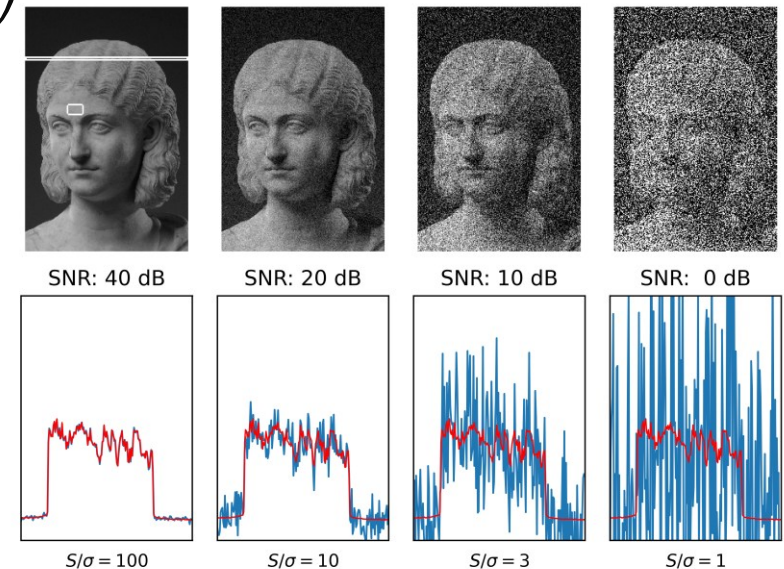


SNR (Signal-to-Noise Ratio) to miara jakości danych określająca stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy szumu.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sygnał}}{P_{szum}} \right)$$

Gdzie: $P_{sygnał}$ - moc sygnału użytecznego (rzeczywista geometria obiektu),
 P_{szum} - moc szumu (losowe fluktuacje położenia punktów).

- Wysoki SNR – czysta stabilna geometria,
- Niski SNR – duży rozrzut punktów, obniżona jakość punktów.



Rys.32 Wpływ poziomu szumu na jakość obrazu i dokładność odwzorowania sygnału. [Źródło](#) ⁶⁷

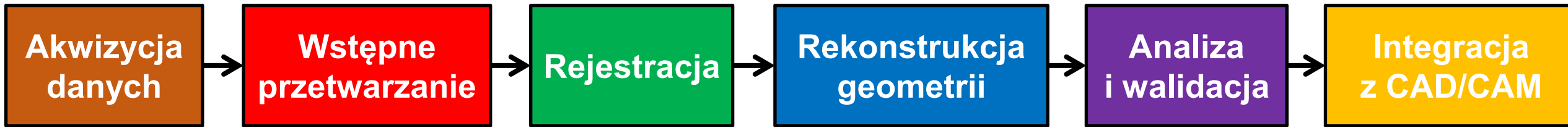


Schemat przetwarzania



68

Schemat przetwarzania danych 3D



Rys.33 Główne etapy przetwarzania danych w inżynierii odwrotnej i rekonstrukcji 3D.

Akwizycja danych:

- Skanowanie 3D,
- Generacja surowej chmury punktów,
- Zapis danych.

Wstępne przetwarzanie:

- Filtracja szumu,
- Usuwanie punktów odstających,
- Redukcja liczby punktów,
- Normalizacja i orientacja układu.

Rejestracja:

- Wstępne dopasowanie,
- Minimalizacja błędu RMS,
- Transformacja do układu globalnego.

Rekonstrukcja geometrii:

- Generacja siatki,
- Triangulacja,
- Aproksymacja powierzchni.

Analiza i walidacja:

- Mapa odchyłek względem CAD,
- RMS, SNR, gęstość,
- Kontrola jakości.

Integracja z CAD/CAM:

- Model parametryczny,
- Modyfikacja geometrii,
- Przygotowanie do druku 3D/CAM.

69



Popularne formaty:

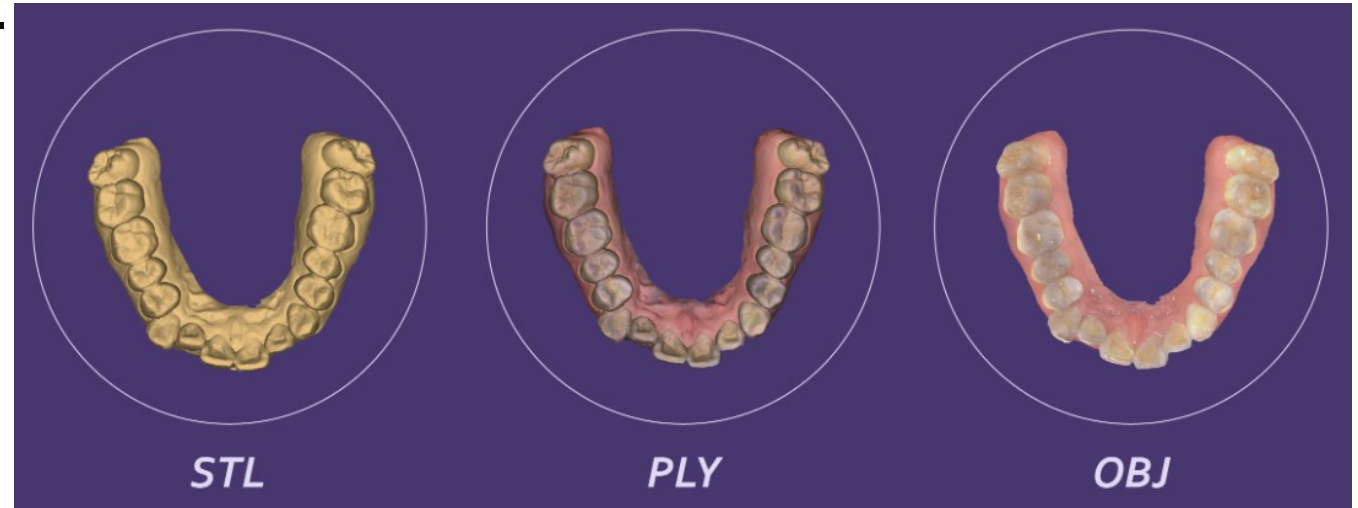
- XYZ - współrzędne punktów,
- PLY - punkty + kolor + normalne,
- OBJ - geometria + siatka,
- STL - model trójwymiarowy (mesh).

Struktura danych:

- Współrzędne (x, y, z),
- Opcjonalnie: kolor (RGB),
- Normalne powierzchni,
- Intensywność odbicia

Aspekty techniczne:

- wielkość plików,
- Kompatybilność z CAD/CAE,
- Konieczność konwersji formatów.



Rys.34 Przykładowe formaty zapisu modeli 3D stosowane w skanowaniu i inżynierii odwrotnej. [Źródło](#)

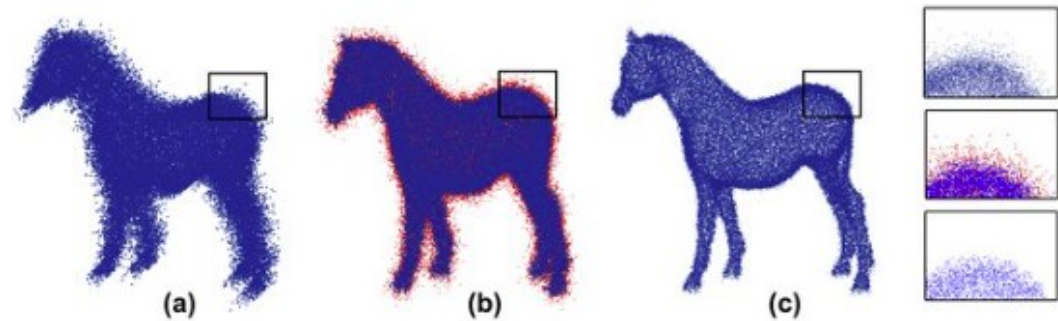
70



Wstępne przetwarzanie jest kluczowe, ponieważ redukcja szumu i usunięcie punktów odstających warunkują stabilność rejestracji (ICP), wiarygodność RMS oraz poprawność rekonstrukcji siatki.

Filtracja szumu:

- Statistical Outlier Removal (SOR),
- Filtr medianowy,
- Filtr Gaussa,
- Moving Least Squares (MLS).



Rys.35 Wpływ filtracji i odszumiania na jakość chmury punktów oraz rekonstruowanej powierzchni 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

71



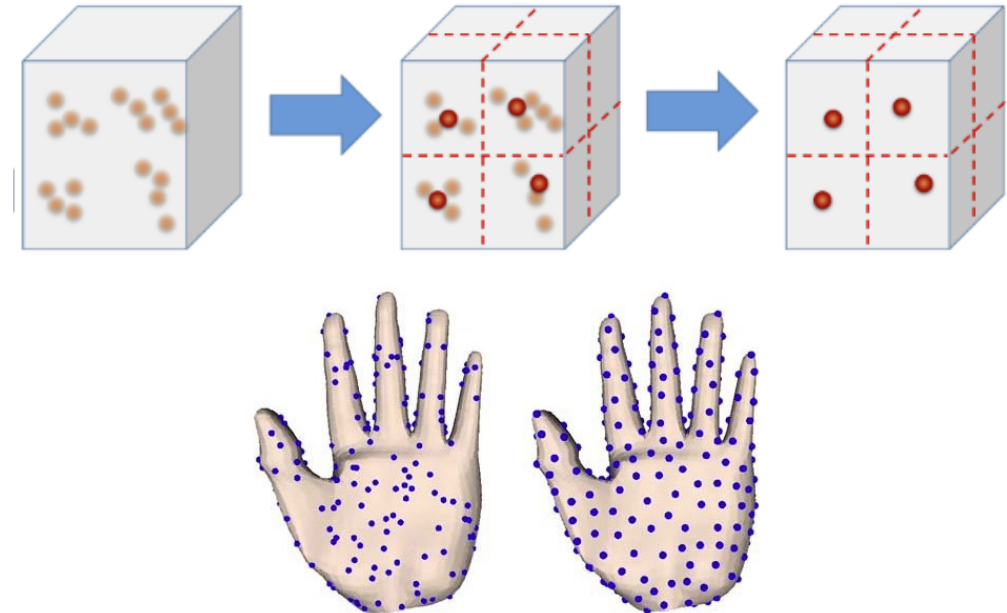
Redukcja liczby punktów (downsampling) jest stosowana w celu ograniczenia objętości danych oraz zwiększenia efektywności obliczeniowej kolejnych etapów przetwarzania, takich jak rejestracja metodą ICP i rekonstrukcja siatki, przy jednoczesnym zachowaniu kluczowych cech geometrycznych obiektu.

Metody:

- Voxel Grid,
- Uniform sampling,

Efekt:

- Mniejsza liczba punktów,
- Zachowanie geometrii globalnej.

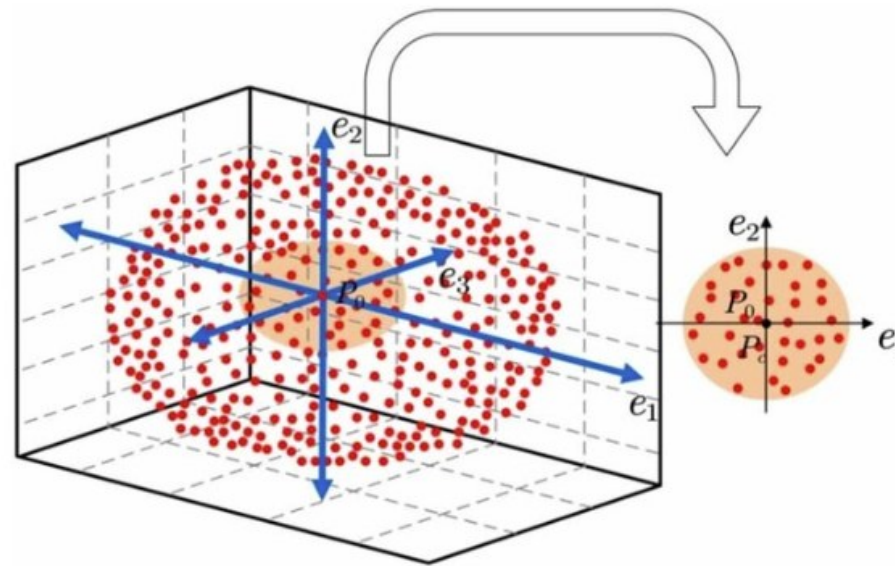


Rys.36 Próbkowanie i redukcja liczby punktów w chmurze punktów oraz na powierzchni obiektu 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

72



Normalizacja i orientacja układu współrzędnych przygotowują chmurę punktów do rejestracji poprzez translację do środka masy, wyrównanie osi (np. metodą PCA) oraz ewentualne skalowanie. Proces ten eliminuje przypadkowe przesunięcie i rotację obiektu, zwiększając stabilność i dokładność dalszych obliczeń.



Rys.37 Lokalna analiza geometrii chmury punktów
w wyznaczonym otoczeniu punktu. [Źródło](#)

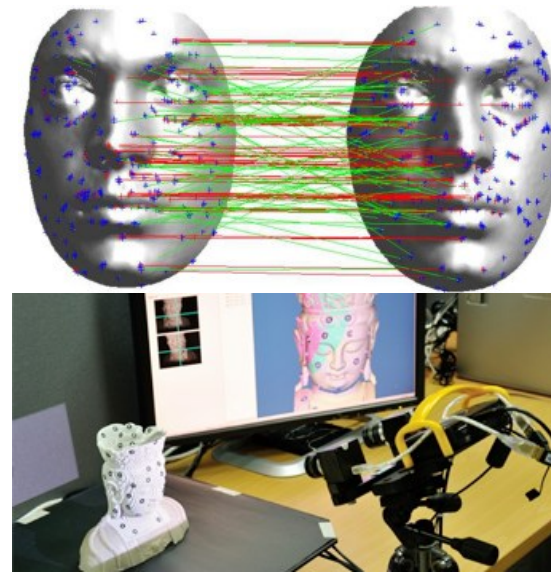
73

Rejestracja polega na wzajemnym dopasowaniu wielu chmur punktów poprzez wstępne ustawienie ich w tej samej przestrzeni oraz wyznaczenie transformacji minimalizującej błąd RMS, tak aby wszystkie dane zostały sprowadzone do wspólnego, globalnego układu współrzędnych.

Metody:

- Markery referencyjne,
- Dopasowanie cech geometrycznych (feature matching),
- Ręczne ustawienie (coarse misalignment),
- Estymacja początkowej transformacji

R_0, t_0 .



Rys.38 Rejestracja i dopasowanie chmur punktów w procesie rekonstrukcji obiektu 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

74



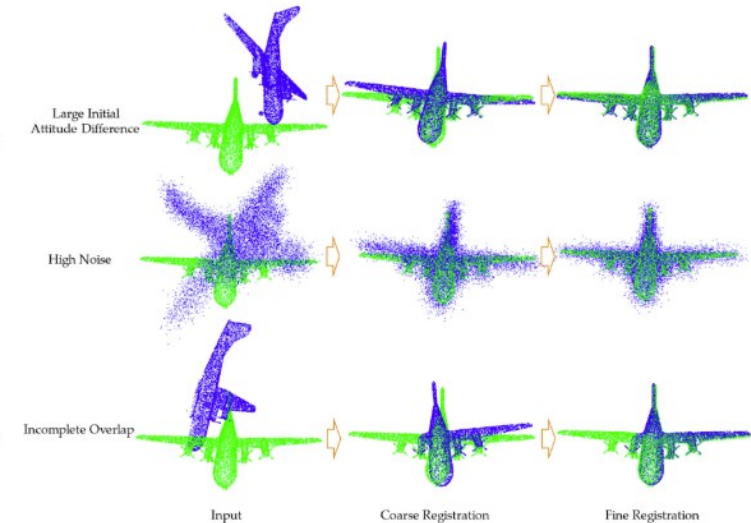
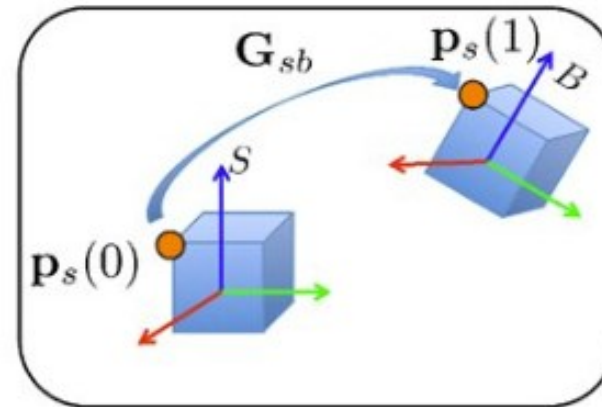
Minimalizacja błędu RMS i transformacja globalna

Celem jest wyznaczenie takiej rotacji R i translacji t , aby chmura ruchoma możliwie najlepiej pokrywała się z chmurą referencyjną w sensie najmniejszych kwadratów.

Model transformacji:

$$p' = Rp + t$$

Gdzie: p - punkt w układzie lokalnym,
 p' - punkt w układzie globalnym,
 R - macierz rotacji (3x3),
 t - wektor translacji.



Rys.39 Etapy i wyzwania rejestracji chmur punktów w obecności szumu, niepełnego pokrycia i różnic orientacji. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

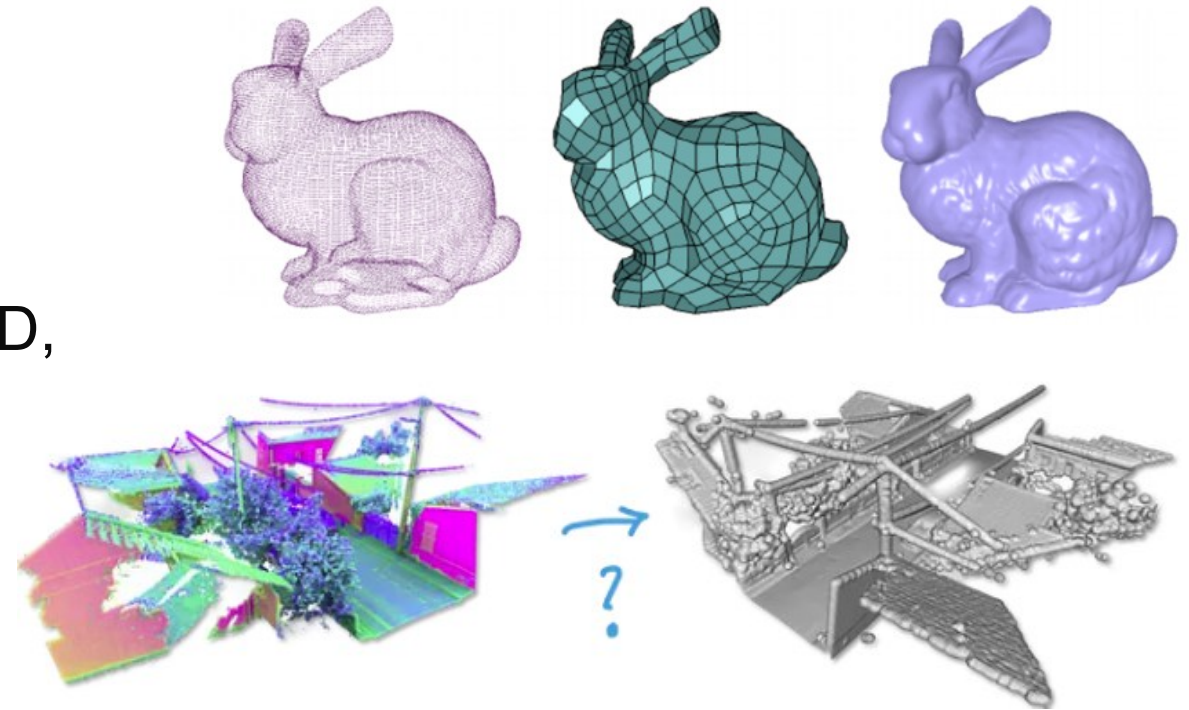


Generacja siatki (Mesh Generation)

Przekształcenie dyskretnej chmury punktów $P = \{(x_i, y_i, z_i)\}$ w strukturę topologiczną (siatkę), opisującą powierzchnię obiektu.

Cel:

- nadanie struktury geometrycznej,
- Utworzenie sąsiedztwa między punktami,
- Przygotowanie do dalszej rekonstrukcji CAD,
- Umożliwienie analizy powierzchni, krzywizn, objętości.



Rys.40 Przejście od chmury punktów do siatki trójkątów i wygładzonego modelu powierzchniowego 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

76



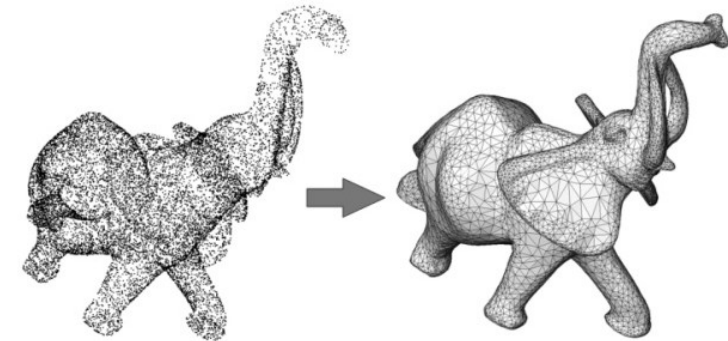
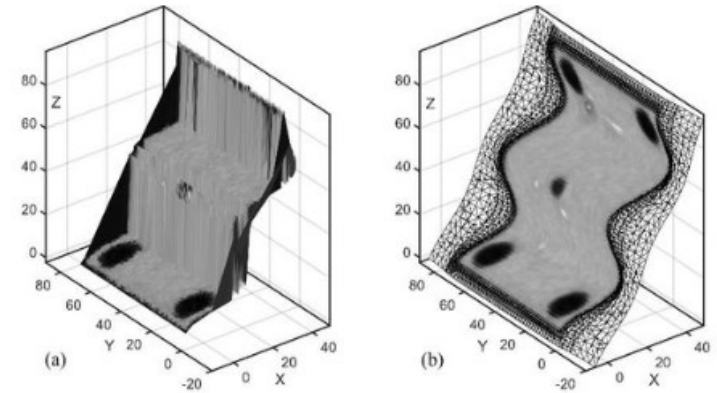
Triangulacja - proces łączenia punktów w elementy trójkątne tworzące dyskretną reprezentację powierzchni.

Najczęściej stosowane metody:

- Triangulacja lokalna,
- Triangulacja Delaunay (maksymalny kąt),
- Rekonstrukcja Poissona (dopasowanie globalne).

Właściwości:

- Trójkąt – element stabilny numerycznie,
- Brak nadmiarowych stopni swobody,
- Dobra aproksymacja powierzchni dowolnej topologii.



Rys.41 Rekonstrukcja powierzchni 3D na podstawie nieuporządkowanych danych punktowych. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

77



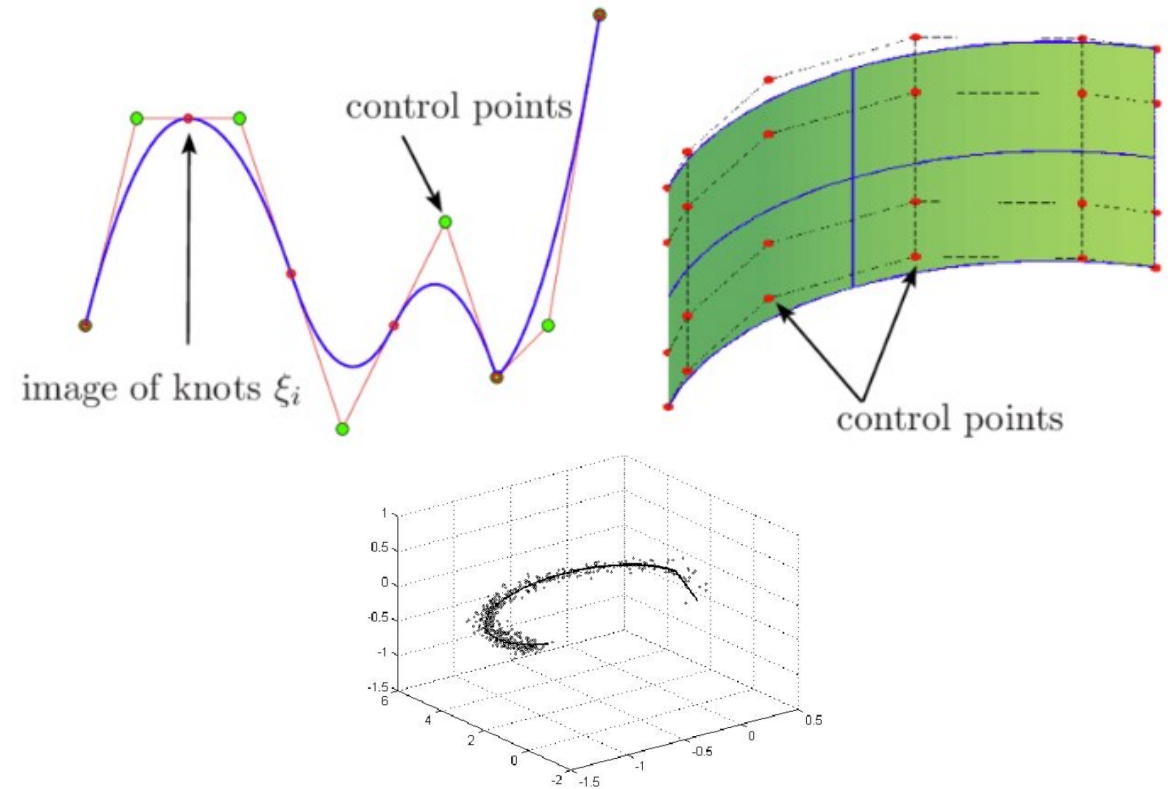
Aproksymacja powierzchni - zastąpienie dyskretnej siatki ciągłym modelem matematycznym.

Dlaczego się ją stosuje:

- Uzyskanie modelu parametrycznego CAD,
- Redukcja szumu pomiarowego,
- Wygładzanie powierzchni,
- Możliwość dalszej edycji konstrukcyjnej.

Modele stosowane w praktyce:

- NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline),
- Powierzchnie B-spline,
- Dopasowanie do najmniejszych kwadratów (fitting least squares).



Rys.42 Modelowanie krzywych i powierzchni parametrycznych z wykorzystaniem punktów kontrolnych. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#) ⁷⁸

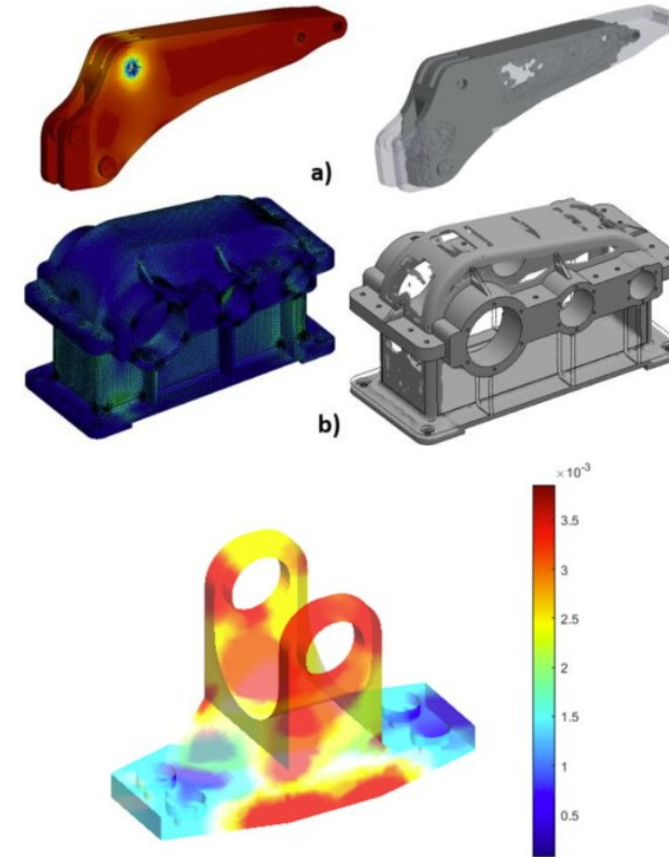


Zakres modyfikacji:

- Zmiana wymiarów,
- Dodanie/edycja otworów,
- Korekta luzów montażowych,
- Optymalizacja topologii,
- Dostosowanie do technologii wytwarzania.

Aspekty inżynierskie:

- Analiza wytrzymałościowa (MES),
- Kompensacja błędów pomiarowych,
- Uwzględnienie skurczu materiału,
- Dopasowanie do narzędzi CAM.



Rys.43 Analiza odchyłek i deformacji geometrycznych modeli 3D elementów inżynierskich. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

79



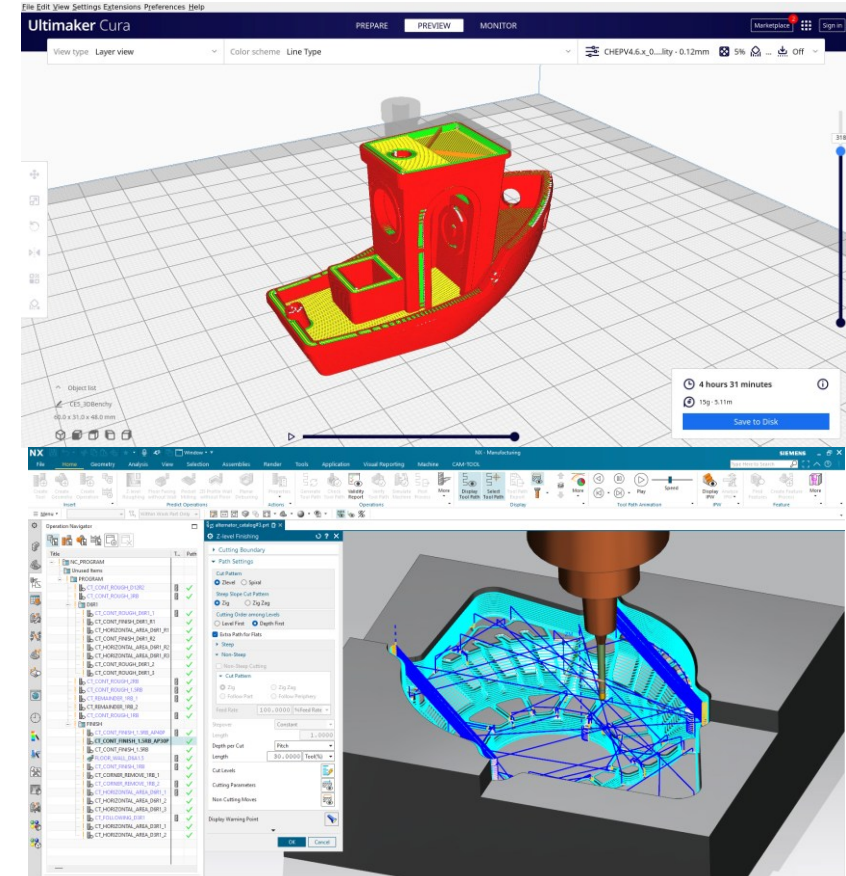
Przygotowanie do druku 3D/CAM

Etapy dla AM (druk 3D):

- Eksport STL/3MF,
- Orientacja modelu,
- Slicing,
- Generacja podpór,
- Dobór parametrów procesu.

Etapy dla CAM (CNC):

- Definicja półfabrykatu,
- Wybór narzędzi,
- Generacja ścieżek narzędzia,
- Symulacja obróbki,
- Postprocessing (generowanie G-code).

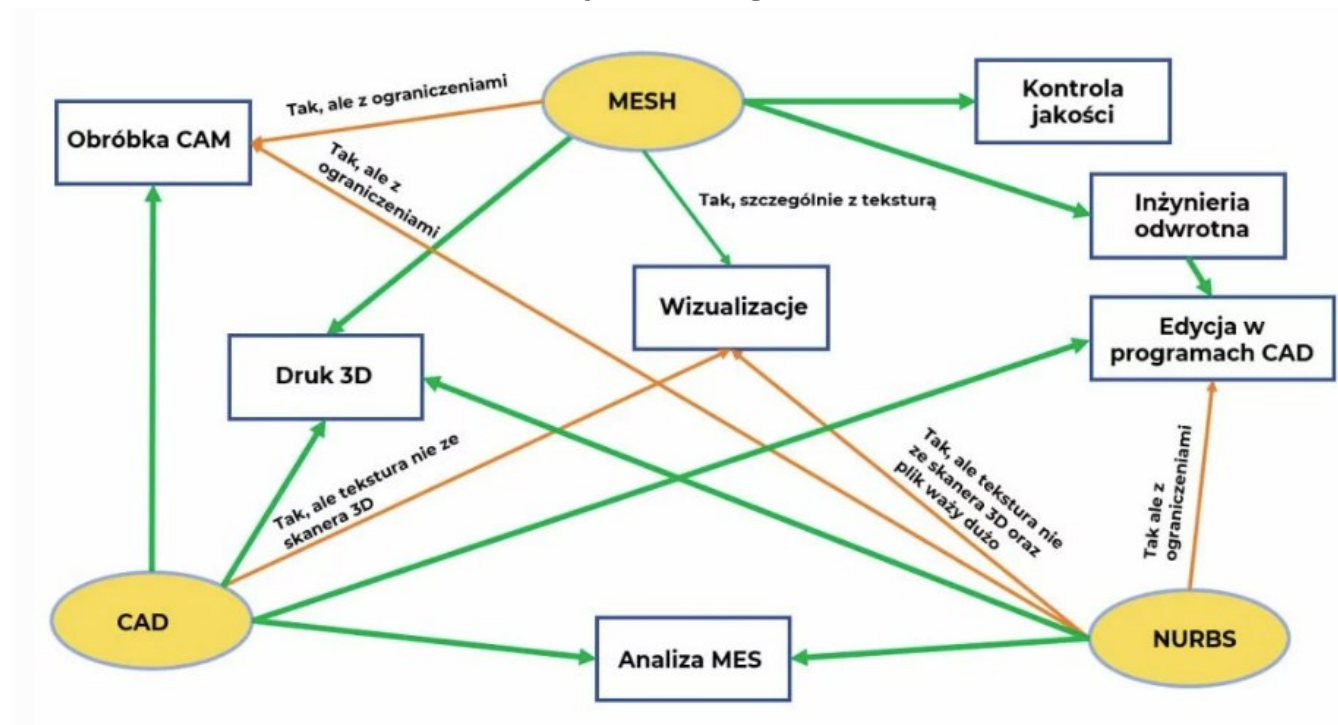


Rys.44 Przygotowanie modeli 3D do wytwarzania w systemach addytywnych i obróbki CAM. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

80



Proces rekonstrukcji obejmuje przejście od danych skanera 3D (MESH) poprzez powierzchnie NURBS do modelu parametrycznego CAD.



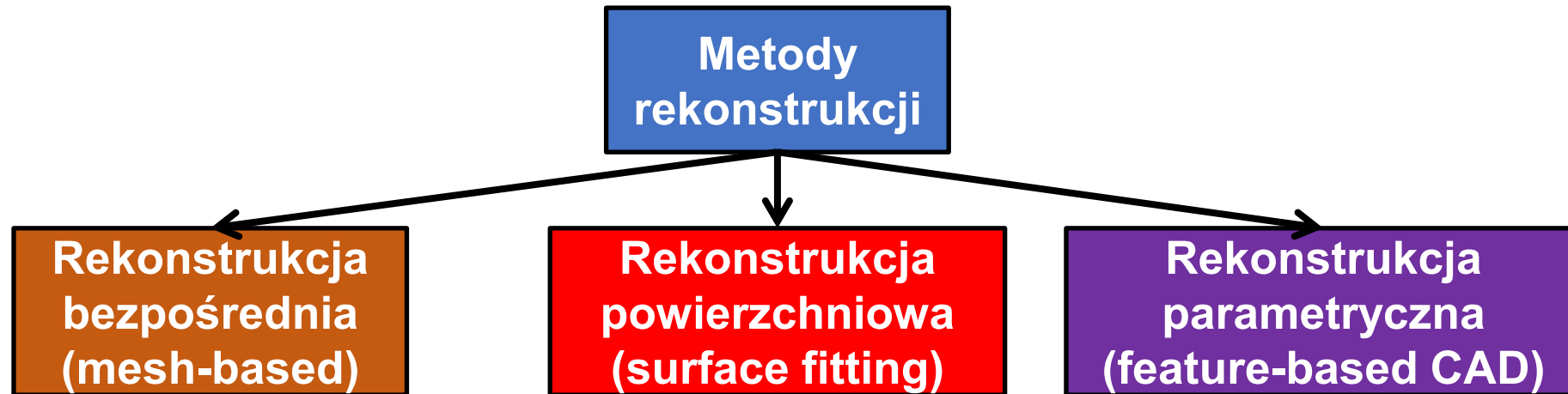
Rys.45 Zastosowania i ograniczenia modeli CAD, MESH i NURBS w procesach projektowania, analizy i wytwarzania. [Źródło](#)

81

Metody rekonstrukcji geometrii



82



Rys.46 Podział metod rekonstrukcji geometrii obiektów 3D.

Kryterium podziału:

- Poziom matematycznej reprezentacji,
- Możliwość edycji,
- Zastosowanie przemysłowe.



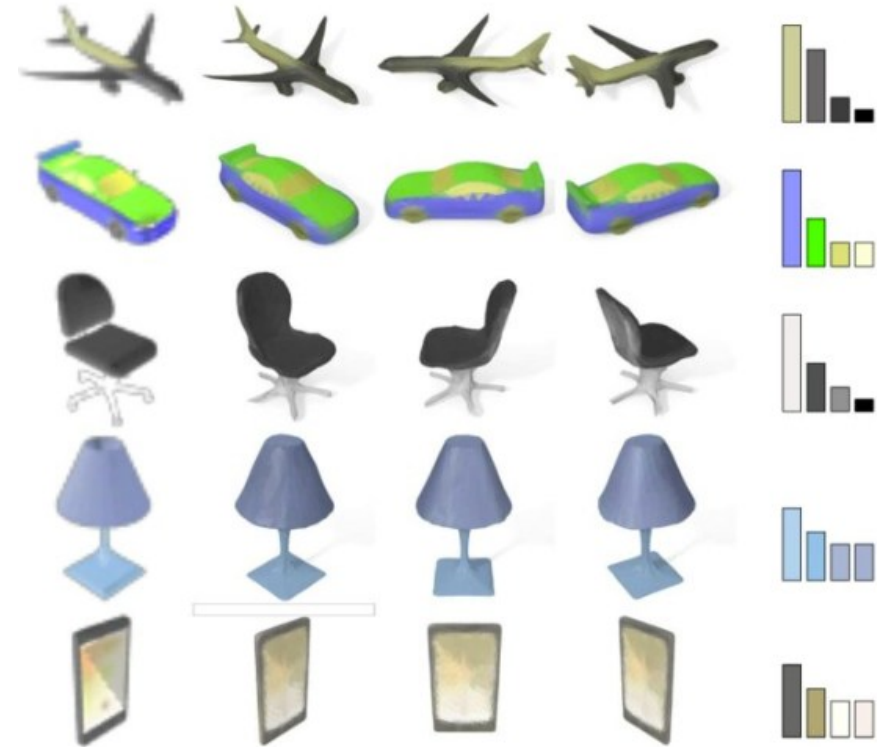
Rekonstrukcja bezpośrednia (mesh-based)

Charakterystyka:

- Operacja bezpośrednio na siatce trójkątów,
- Brak przejścia do modelu parametrycznego,
- Szybka implementacja.

Typowe operacje:

- Wygładzanie (Laplacian smoothing),
- Redukcja liczby trójkątów (decimation),
- Wypełnianie otworów,
- Filtracja szumu.



Rys.47 Przykłady rekonstrukcji i uzupełniania kształtu obiektów 3D na podstawie niepełnych danych. [Źródło](#) ⁸⁴



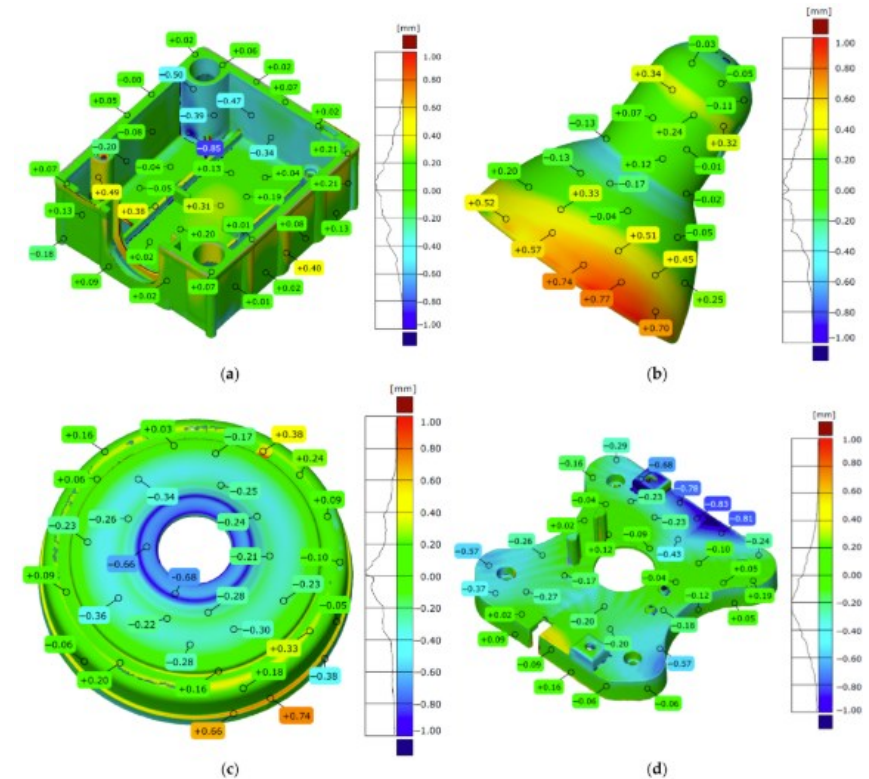
Rekonstrukcja parametryczna (feature-based CAD)

Charakterystyka:

- Identyfikacja cech konstrukcyjnych (features),
- Dopasowanie powierzchni analitycznych,
- Odtworzenie historii operacji CAD,
- Pełna parametryzacja wymiarów,
- Zachowanie intencji konstrukcyjnej.

Typowe operacje:

- Segmentacja,
- Dopasowanie,
- Rozpoznanie cech (otwory, ścięcia montażowe),
- Odtworzenie operacji.



Rys.48 Mapy odchyłek wymiarowych analizowanych elementów względem modelu odniesienia. [Źródło](#)

85



Tab.1 Porównanie metod rekonstrukcji 3D pod względem reprezentacji, edytowalności i obszaru zastosowań.

Metoda	Reprezentacja	Edytowalność	Zastosowanie
Bespośrednia (mesh-based)	Trójkąty (Triangulacja)	Niska	Wizualizacja, techniki przyrostowe (AM)
Powierzchniowa (surface fitting)	NURBS	Średnia	Inżynieria odwrotna, CAD
Parametryczna (feature-based)	Parametryczna	Wysoka	Produkcja



Dziękuję za uwagę

Wykład 3

Temat: Rekonstrukcja modeli CAD z chmur punktów

Dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz,
Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej,
Katedra Informatyki Technicznej

1. Od chmury punktów do siatki
2. Reprezentacje geometryczne w inżynierii
3. Rekonstrukcja powierzchni
4. Model parametryczny CAD
5. Zastosowania i automatyzacja



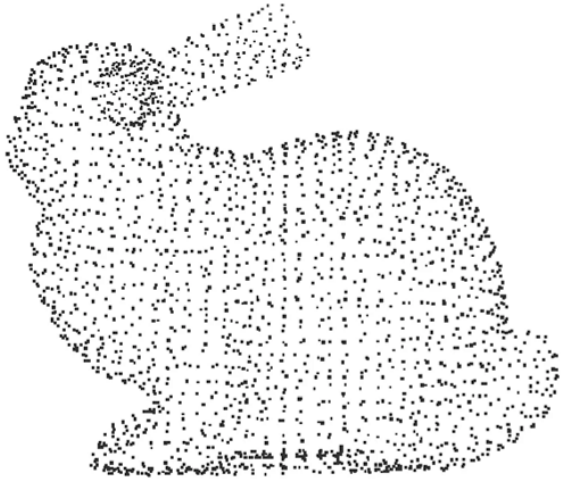
Od chmury punktów do siatki



90

Dlaczego potrzebny jest mesh?

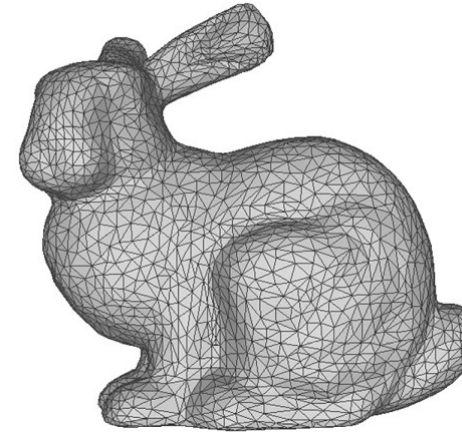
Chmura punktów



- Zbiór punktów (x, y, z) ,
- Brak ciągłej informacji o sąsiedztwie punktów,
- Brak ciągłej powierzchni,
- Trudna analiza geometrii

Rys.1 Przykład chmury punktów opisującej geometrię obiektu 3D. [Źródło](#)

Mesh - Siatka



- Reprezentacja ciągłej powierzchni,
- Połączenie punktów w trójkąty,
- Zawiera topologię powierzchni,
- Umożliwia analizę geometrii

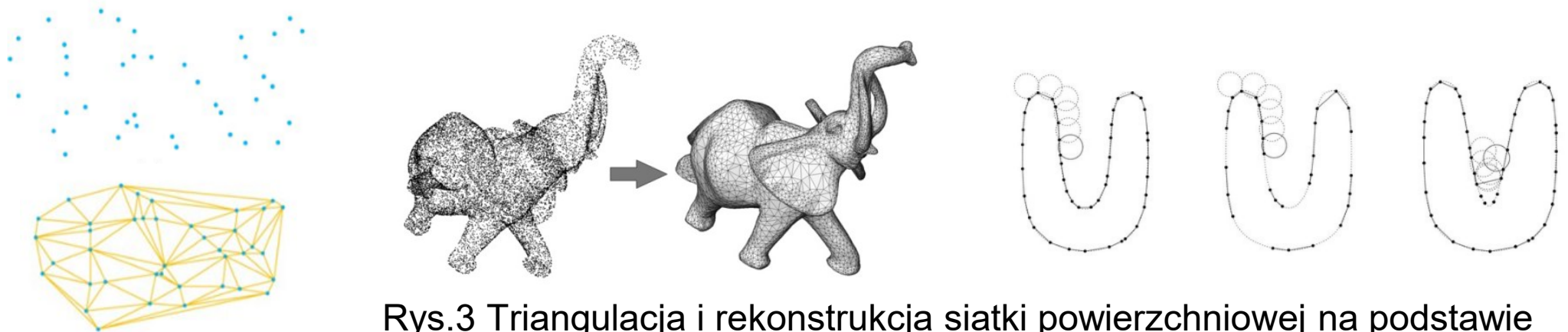
Rys.2 Przykład siatki trójkątów (mesh) opisującej powierzchnię obiektu 3D. [Źródło](#)

Chmura punktów opisuje tylko położenie punktów, natomiast mesh wprowadza strukturę topologiczną powierzchni.



Celem triangulacji jest rekonstrukcja powierzchni na podstawie punktów pomiarowych. Najczęściej stosowane metody:

- **Triangulacja Delaunay'a (Delaunay triangulation)** - tworzenie siatki trójkątów o optymalnej geometrii,
- **Rekonstrukcja powierzchni Poissona'a (Poisson Surface Reconstruction)** - rekonstrukcja gładkiej powierzchni z danych punktowych,
- **Ball Pivoting Algorithm (BPA)** - symulacja kulki toczącej się po punktach.

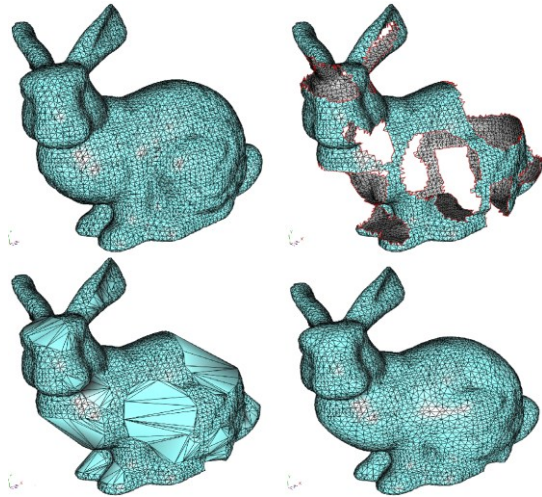


Rys.3 Triangulacja i rekonstrukcja siatki powierzchniowej na podstawie chmury punktów. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

92

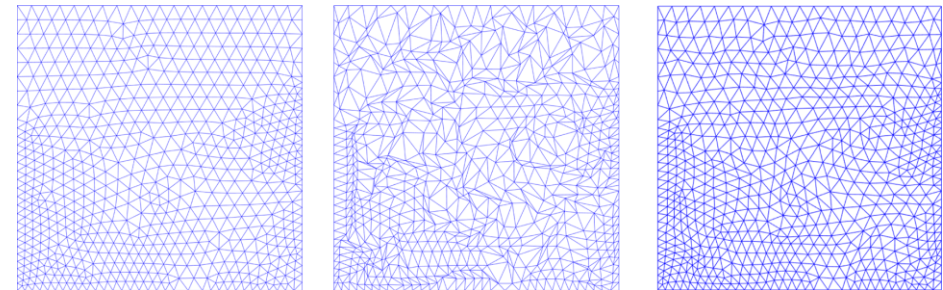
Typowe operacje przetwarzania siatki:

- **Hole filling** - uzupełnianie brakujących fragmentów powierzchni,
- **Smoothing** - redukcja szumu geometrycznego,
- **Remeshing** - poprawa jakości siatki,
- **Decimation** - redukcja liczby trójkątów.



Rys.4 Etapy naprawy i optymalizacji siatki trójkątów modelu 3D. [Źródło](#)

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach:
FUNDUSZE EUROPEJSKIE DLA ROZWOJU SPOŁECZNEGO 2021-2027 (FERS)
"POLLUB z nami nowoczesne technologie" FERS.01.05-IP.08-0319/23-00

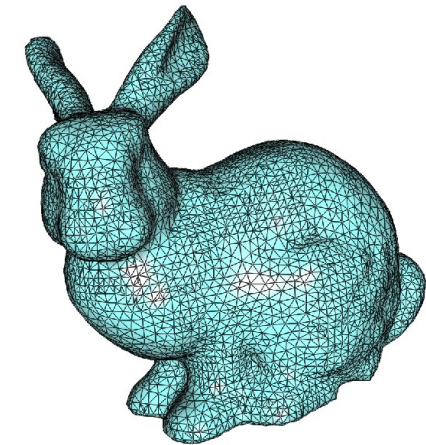
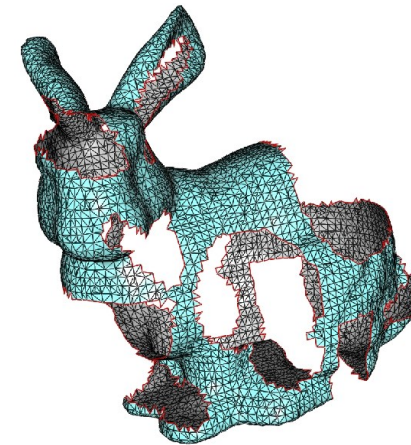
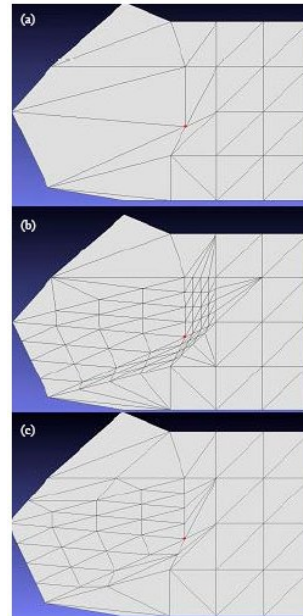
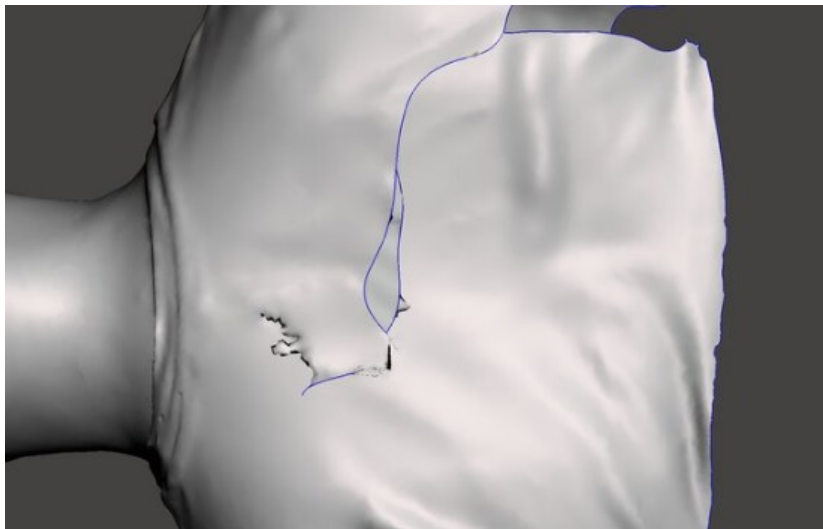


Rys.5 Wpływ zagęszczenia i jakości siatki na dokładność odwzorowania geometrii obiektu 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Problemy siatek (mesh artifacts)

Typowe problemy w siatkach:

- **Artefakty geometryczne** - szum, ostre igły, nierówności powierzchni,
- **Zniekształcenia elementów** - bardzo wydłużone trójkąty,
- **Brak ciągłości powierzchni** - dziury, nierównomierne krawędzie.



Rys.6 Wykrywanie, uzupełnianie i naprawa uszkodzeń siatki trójkątów modelu 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

94

Tab.1 Podstawowe wskaźniki oceny jakości siatki trójkątów oraz ich interpretacja.

Wskaźniki jakości siatki	Definicja/wzór	Zakres wartości	Interpretacja jakości
Aspect Ratio	$AR = \frac{l_{max}}{h_{min}}$ (najdłuższa krawędź/najmniejsza wysokość trójkąta)	$AR \geq 1$	1 – idealny trójkąt równoboczny, 1-3 – bardzo dobra siatka, 3-10 – akceptowalna, >10 – zła jakość (wydłużone elementy)
Minimalny kąt	Najmniejszy kąt w trójkącie siatki	$0^\circ - 60^\circ$	$\approx 60^\circ$ - idealny element, $> 30^\circ$ - dobra jakość, $20^\circ - 30^\circ$ - akceptowalna, $< 20^\circ$ - zła siatka,
Skewness (Skośność)	Miara deformacji elementu względem idealnego kształtu	$0 - 1$	0 - idealny element, 0 – 0.25 - bardzo dobra jakość, 0.25 – 0.5 - dobra, 0.5 – 0.8 - słaba, > 0.8 – bardzo zła
Triangle Quality Index	$Q = \frac{4\sqrt{3}A}{\sum l_i^2}$	$0 < Q < 1$	1 - idealny trójkąt, 0.7 – 1 – bardzo dobra siatka, 0.4 – 0.7 - akceptowalna, 0.4 - zła jakość,

Reprezentacje geometryczne w inżynierii

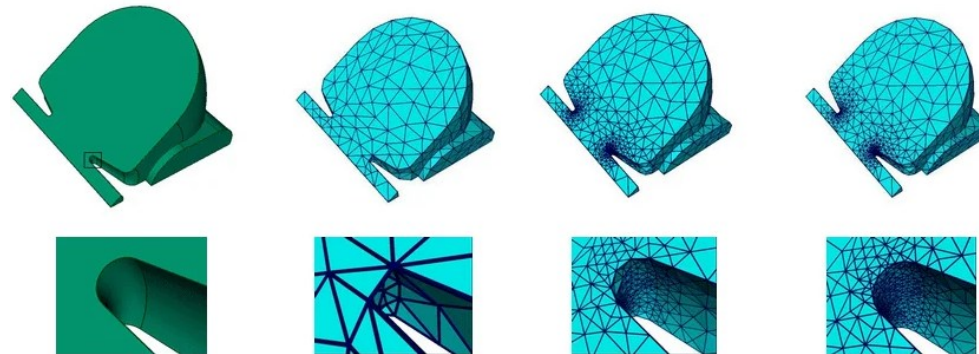


96

Mesh vs. CAD

Tab.2 Porównanie siatki i modelu CAD.

Siatka/Mesh	CAD
Trójkąty	Powierzchnie matematyczne
Dyskretny model	Model parametryczny
Brak historii modelowania	Pełna historia operacji
STL/OBJ	STEP/IGES

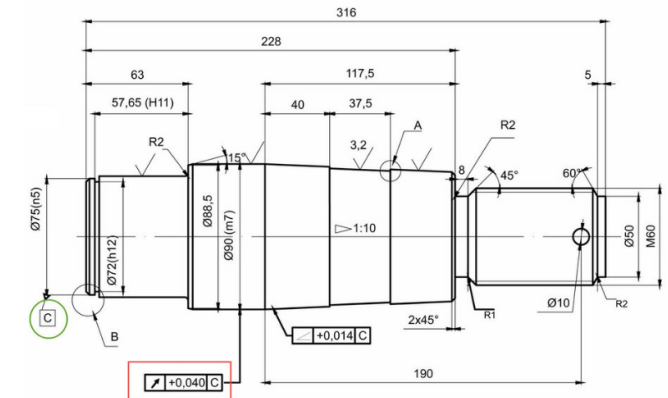
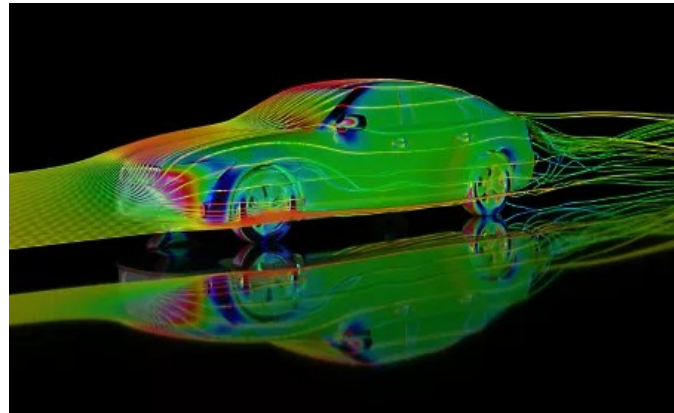
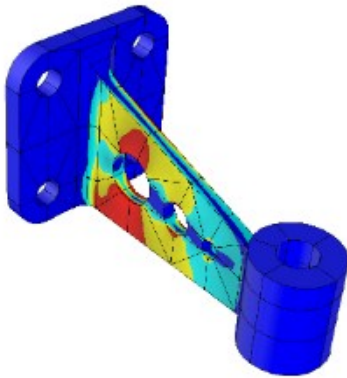


Rys.7 Wpływ zagęszczenia i jakości siatki na odwzorowanie geometrii modelu. [Źródło](#)

Dlaczego potrzebujemy CAD?

Model CAD umożliwia:

- **Modyfikację geometrii** (np. zmiana geometrii, wymiarów),
- **Analizy i symulacje** - (FEM - Finite Element Method, CFD - Computational Fluid Dynamics),
- **Wytwarzanie CAM** - generowanie ścieżek narzędzia,
- **Dokumentację techniczną** - rysunki 2D i tolerancje.

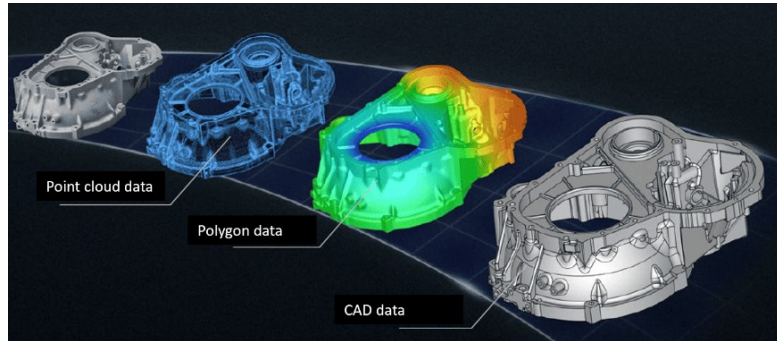


Rys.8 Zastosowania modeli CAD w analizie, symulacji i dokumentacji technicznej. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

98

Model CAD umożliwia:

- **Manual reverse engineering** - ręczne dopasowanie powierzchni CAD, wysoka dokładność, czasochłonność,
- **Semi-automatic** - częściowa automatyzacja, detekcja powierzchni,
- **Automatic reconstruction** - algorytmy AI/geometryczne, szybka rekonstrukcja, mniejsza kontrola nad modelem.



Rys.9 Przekształcanie danych skanowania 3D do postaci modeli poligonowych i CAD oraz ich zastosowanie w cyfrowym odwzorowaniu obiektów. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

99



Rekonstrukcja powierzchni

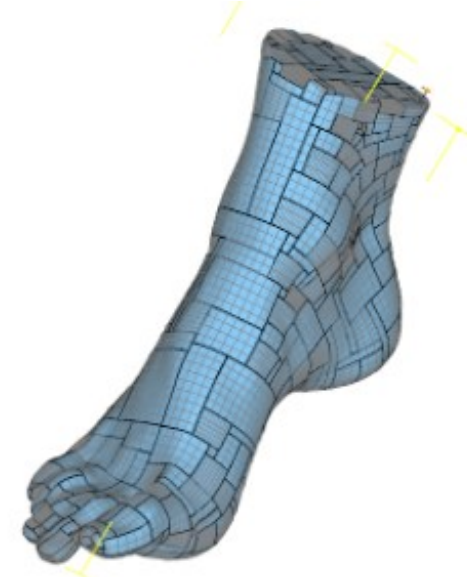
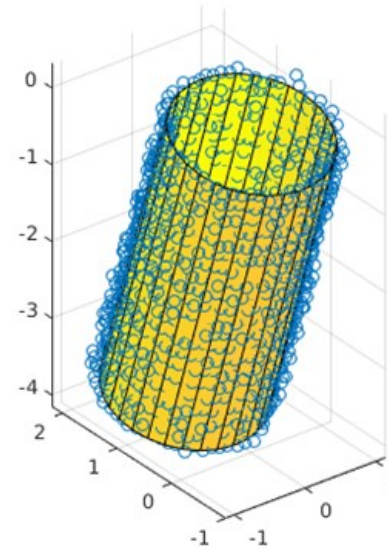
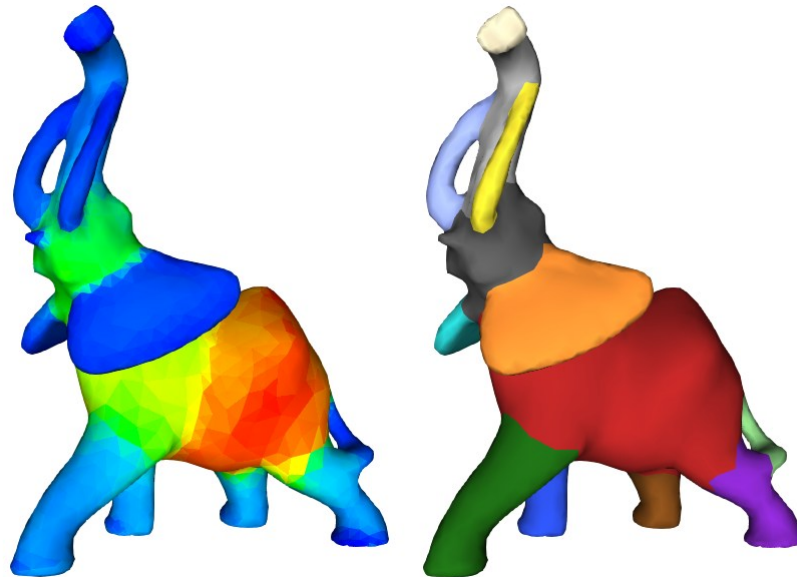


100

Segmentacja powierzchni

Typowe typy powierzchni:

- **Plane** - powierzchnie płaskie,
- **Cylinder** - powierzchnie walcowe (np. wały, otwory),
- **Freeform** - powierzchnie swobodne o zmiennej krzywiznie.

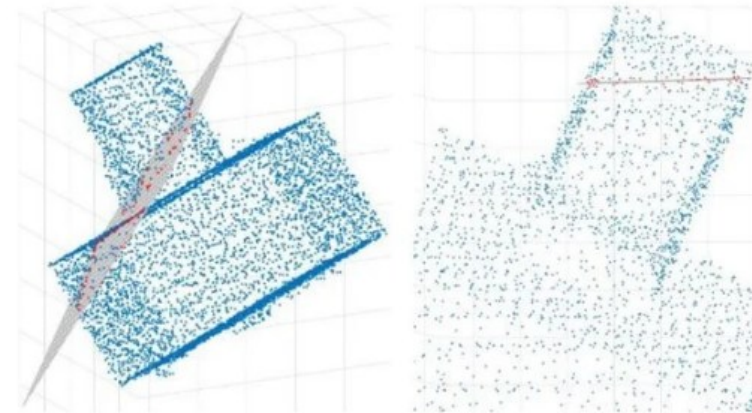
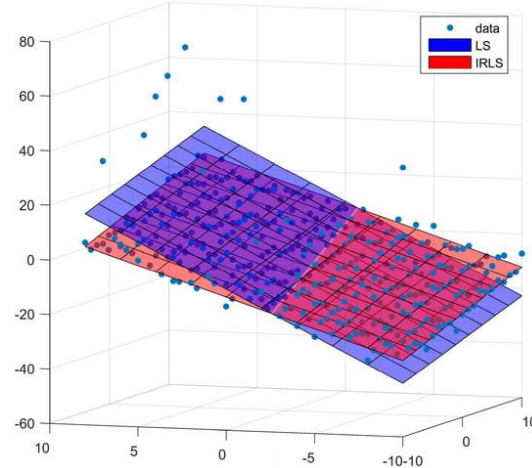


Rys.10 Segmentacja i parametryzacja powierzchni modeli 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

101

Detekcja powierzchni analitycznych - proces identyfikacji prostych prymitywów geometrycznych w chmurze punktów lub siatce. Do typowych algorytmów należą:

- **RANSAC (Random Sample Consensus) plane detection** - wykrywanie płaszczyzn,
- **Cylinder detection** – identyfikacja powierzchni walcowych,
- **Curvature estimation** – analiza krzywizny powierzchni.



Rys.11 Dopasowanie powierzchni geometrycznych do danych chmury punktów. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

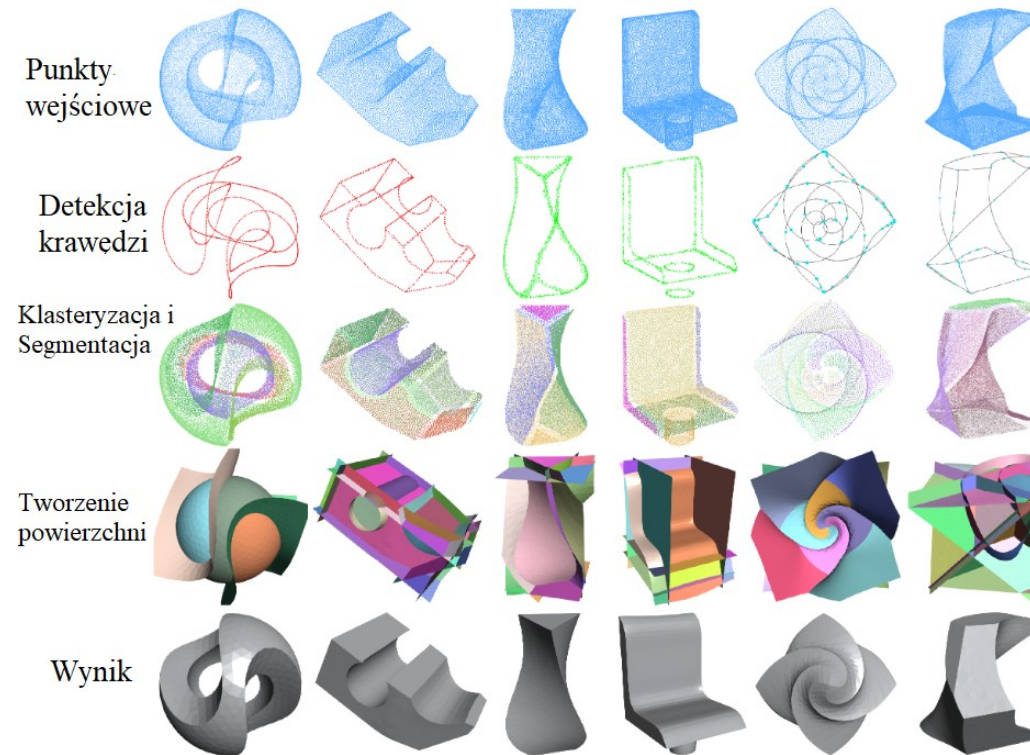
Detekcja cech geometrycznych - proces identyfikacji charakterystycznych elementów geometrii w danych 3D.

Typowe cechy:

- **Edges** - ostre krawędzie,
- **Corners** - narożniki,
- **Curvature extrema** - obszary dużej krzywizny

Metody detekcji:

- Analiza krzywizny powierzchni,
- Analiza wektorów normalnych,
- Detekcja gradientów geometrii,



Rys.12 Etapy rekonstrukcji powierzchniowej od chmury punktów do końcowego modelu 3D. [Źródło](#)

103



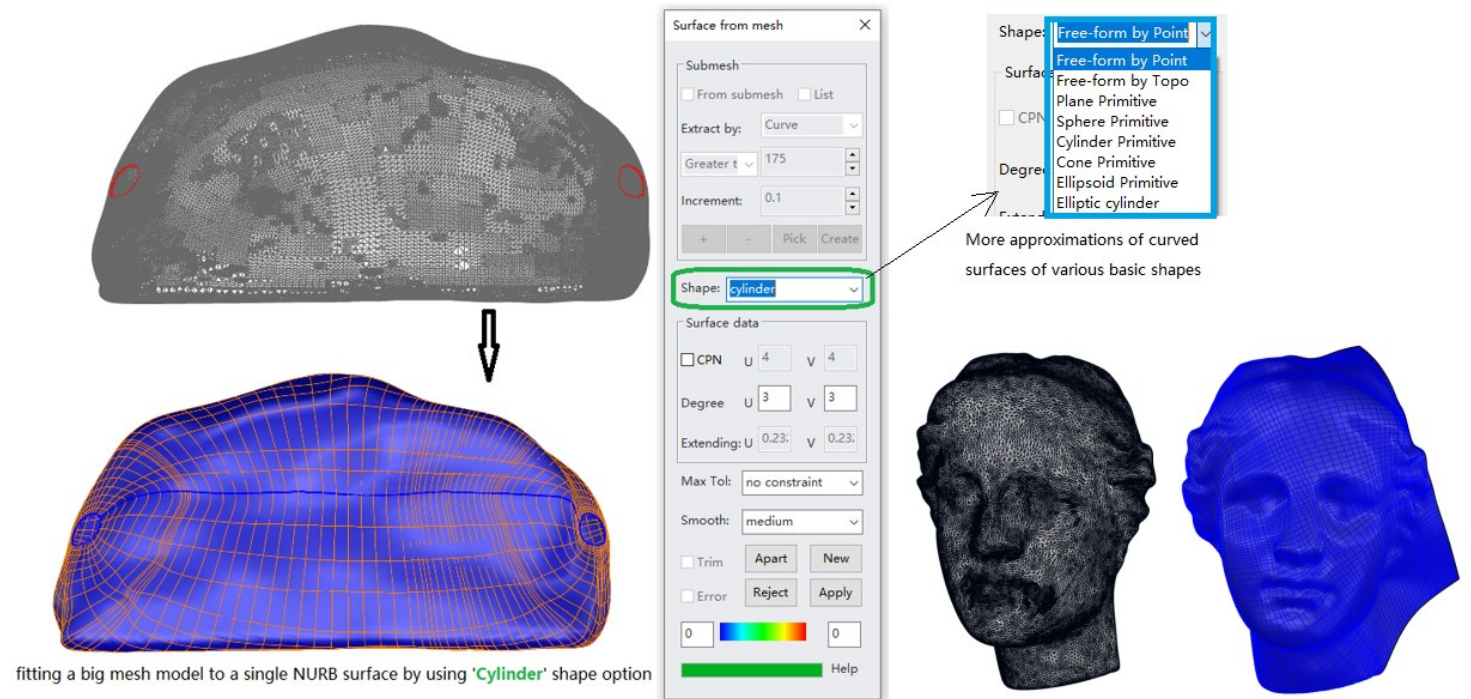
Rekonstrukcja powierzchni freeform - proces aproksymacji złożonych powierzchni na podstawie danych skanowania 3D.

Charakterystyka:

- Brak prostych prymitywów geometrycznych,
- Zmienna krzywizna powierzchni,
- Złożona geometria.

Typowe metody:

- NURBS surface fitting,
- B-spline surfaces,
- Aproksymacja minimalizująca błąd RMS



Rys.13 Dopasowanie powierzchni NURBS do siatki modelu 3D. [Źródło](#)

104



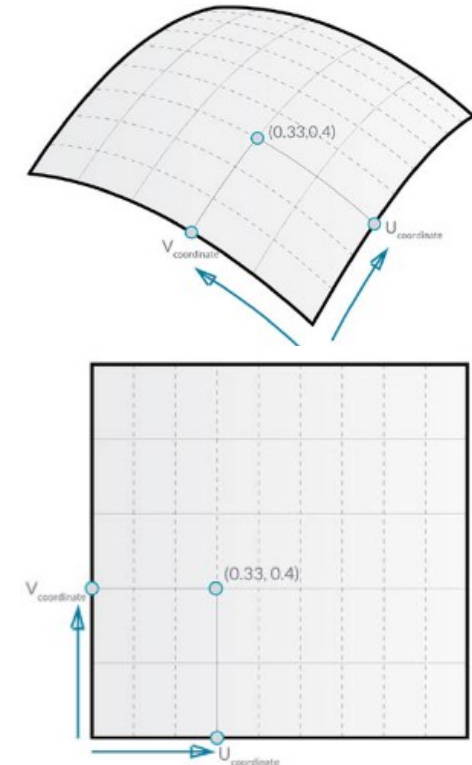
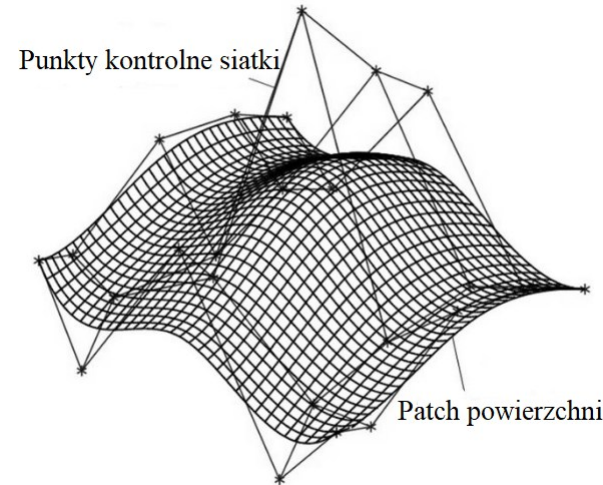
Surface patches - złożone powierzchnie freeform są reprezentowane jako zbiór mniejszych powierzchni, tzw. patches.

Charakterystyka:

- Każda powierzchnia opisana parametrycznie (U , V),
- Najczęściej NURBS lub B-Spline,
- Patch'e łączą się wzdłuż wspólnych krawędzi.

Zalety:

- Dokładne odwzorowanie złożonej geometrii,
- Kontrola lokalnego kształtu powierzchni,
- Łatwiejsza edycja modelu CAD.



Rys.14 Powierzchnia parametryczna opisana punktami kontrolnymi i współrzędnymi u, v . Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

105



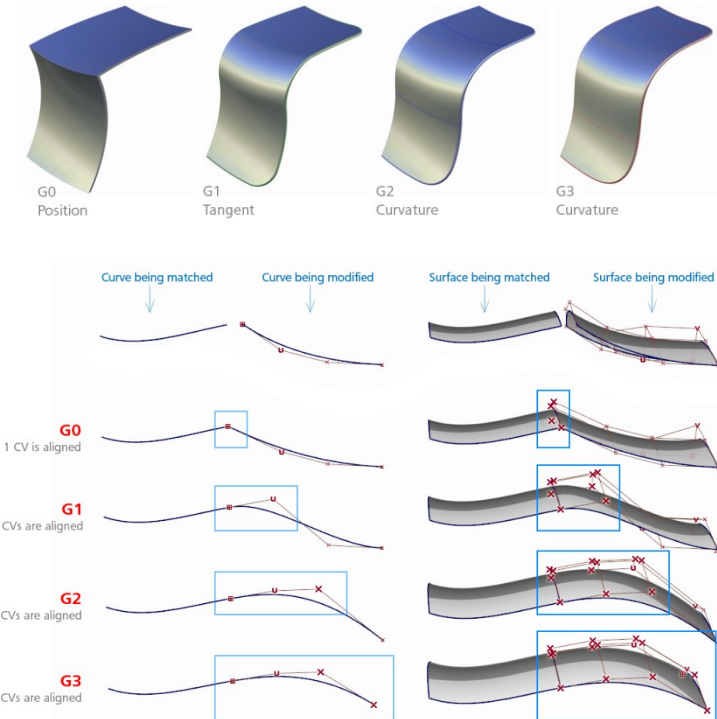
Ciągłość powierzchni - ciągłość określa stopień gładkości połączenia powierzchni CAD.

Poziomy ciągłości:

- G0 (continuity) - powierzchnie mają wspólną krawędź,
- G1 (tangent) - ciągłość styczna,
- G2 (curvature) - ciągłość krzywizny,
- G3 (curvature rate) - zgodność zmiany krzywizny

Znaczenie:

- Gładkie przejścia powierzchni,
- Wysoka jakość modeli CAD,
- Zastosowania w aerodynamice i projektowaniu.



Rys.15 Poziomy ciągłości geometrycznej krzywych i powierzchni parametrycznych (G0-G3). Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

106



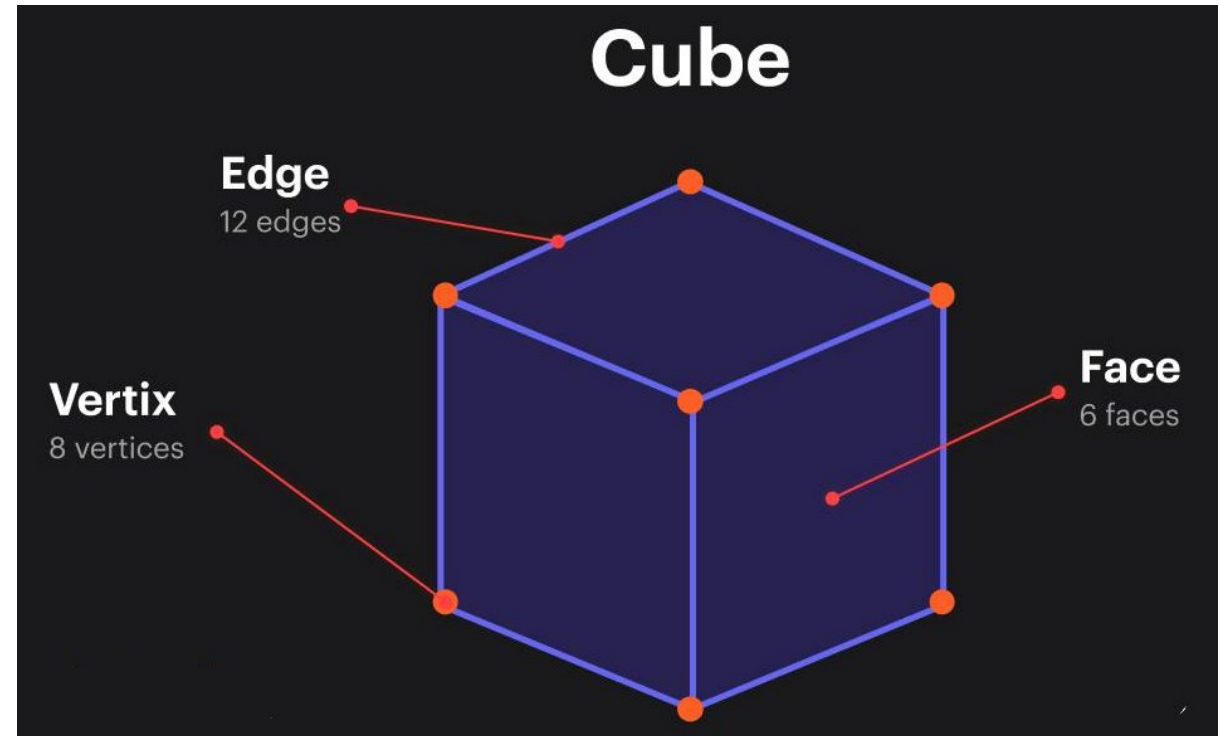
Budowa topologii powierzchni - proces tworzenia relacji między powierzchniami modelu CAD.

Elementy topologii:

- Faces - powierzchnie,
- Edges - krawędzie,
- Vertices - wierzchołki.

Funkcja topologii:

- Definiuje relacje między powierzchniami,
- Zapewnia spójność modelu,
- Umożliwia operacje CAD.



Rys.16 Podstawowe elementy topologii bryły: wierzchołki, krawędzie i ściany. [Źródło](#)

107



Model parametryczny CAD

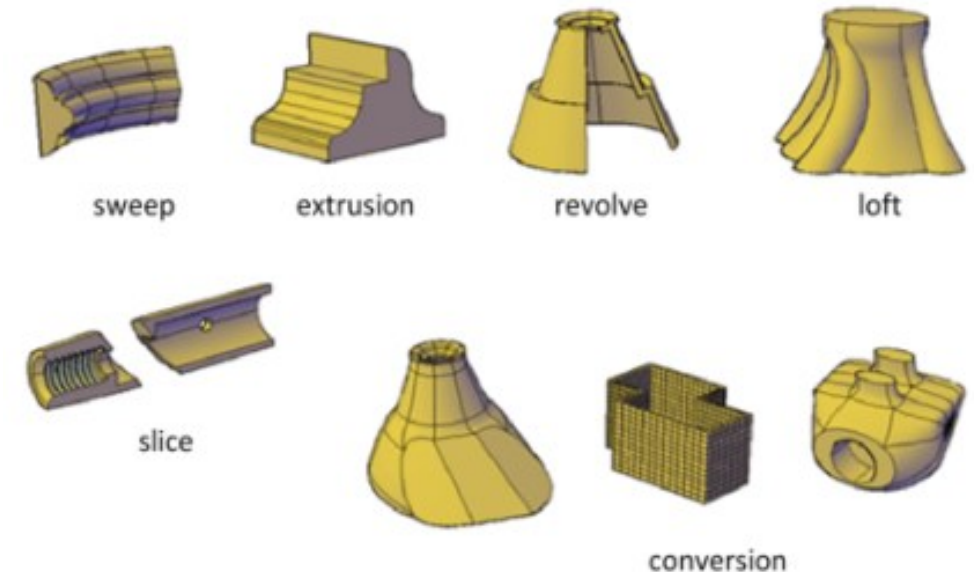


108

Model CAD powstaje poprzez operacje parametryczne wykonywane na szkicach geometrycznych.

Operacje modelowania:

- **Sketch** - szkic 2D stanowiący podstawę modelu,
- **Extrude** - wyciągnięcie szkicu wzdłuż osi,
- **Revolve** - obrót szkicu wokół osi,
- **Loft/Sweep** - tworzenie powierzchni lub bryły między profilami



Rys.17 Przykładowe operacje modelowania bryłowego i powierzchniowego w systemach CAD. [Źródło](#)

109



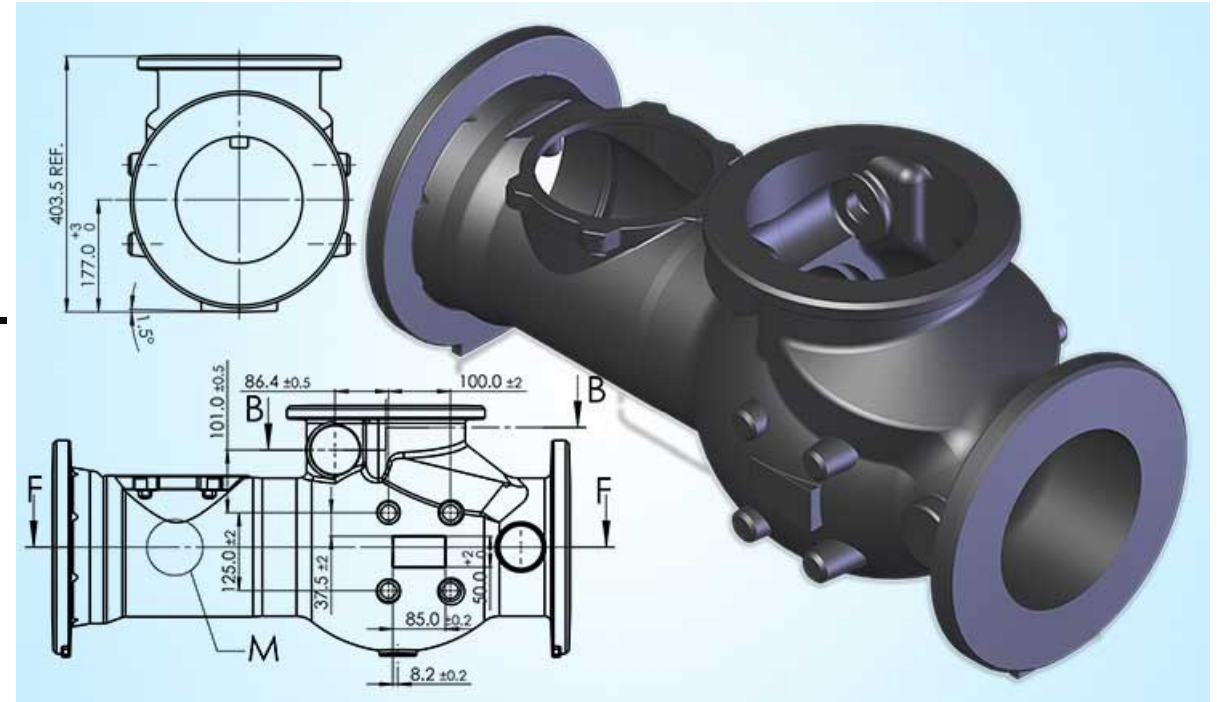
Model bryłowy - reprezentacja obiektu w systemie CAD jako zamknięta bryła 3D o określonej objętości.

Charakterystyka:

- Model posiada objętość i masę,
- Opis geometrii oraz topologii obiektu,
- Możliwość analizy właściwości fizycznych.

Typowe reprezentacje:

- **B-rep** (Boundary Representation) - opis powierzchni ograniczających bryłę,
- **CSG** (Constructive Solid Geometry) - operacje na bryłach elementarnych.



Rys.18 Model CAD elementu technicznego wraz z dokumentacją wymiarową. [Źródło](#)

110



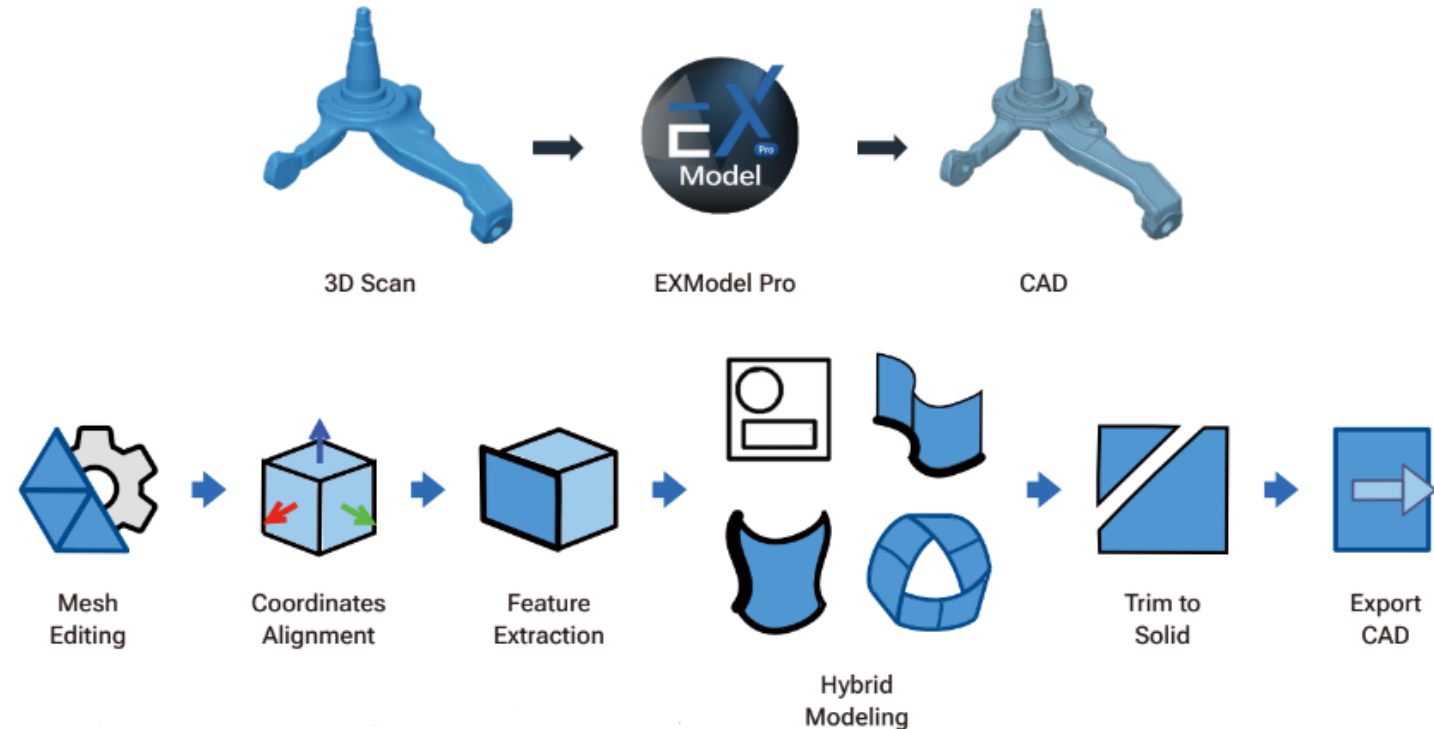
Integracja z CAD - proces przeniesienia danych pomiarowych do środowiska CAD.

Etapy integracji:

- Import chmury punktów/mesh,
- Rekonstrukcja powierzchni CAD,
- Budowa modelu parametrycznego.

Typowe formaty danych:

- **STL** - siatka trójkątów,
- **OBJ/PLY** - chmury punktów i mesh,
- **STEP/IGES** - modele CAD.



Rys.19 Etapy przekształcania skanu 3D w parametryczny model CAD. [Źródło](#)

111



Eksport modelu do druku 3D

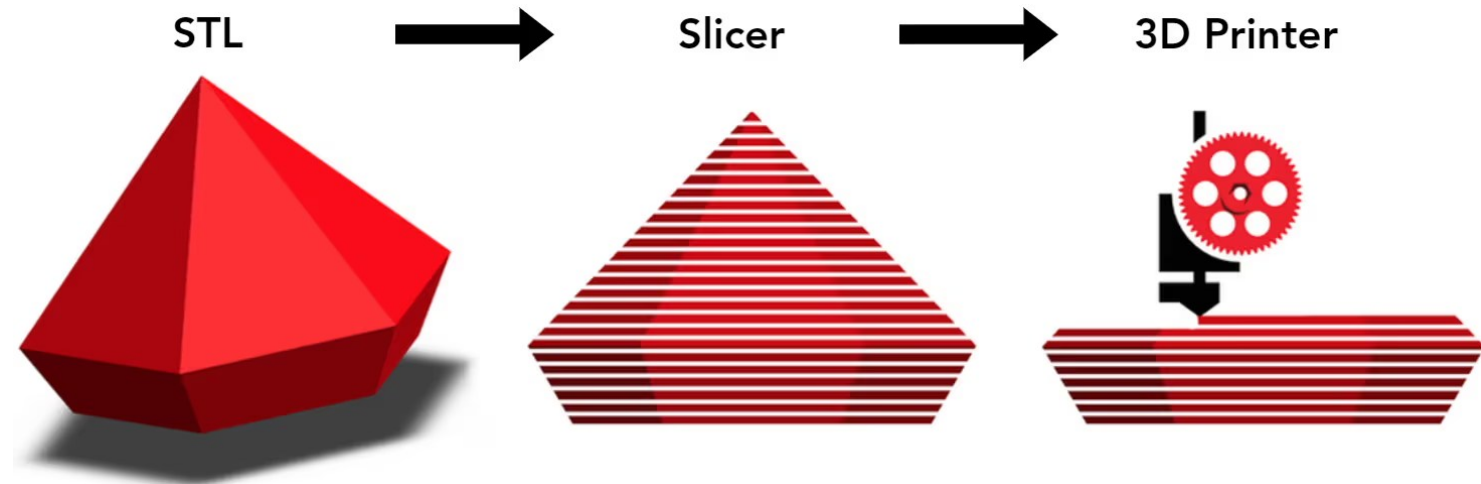
Model CAD musi zostać przygotowany i przekształcony w postać umożliwiającą jego wydruk w technologii 3D. Model jest następnie dzielony na warstwy (slicing), które określają kolejne etapy budowy obiektu w drukarce 3D.

Etapy:

- Konwersja modelu CAD do mesh,
- Przygotowanie modelu w slicerze,
- Generowanie warstw (layers),
- Wysłanie pliku do drukarki 3D.

Wymagania modelu:

- Model musi być zamkniętą bryłą,
- Brak błędów geometrii,
- Odpowiednia orientacja druku,



Rys.20 Przygotowanie modelu STL do druku 3D z wykorzystaniem slicera. [Źródło](#)

112



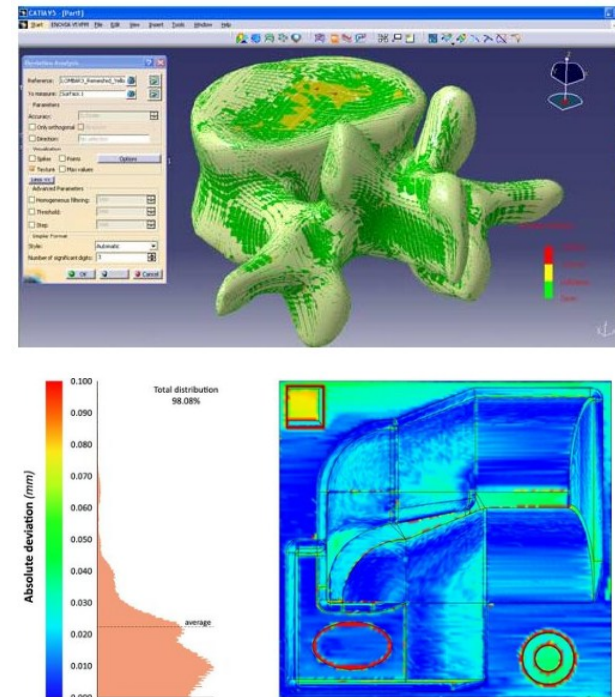
Model CAD musi zostać przygotowany i przekształcony w postać umożliwiającą jego wydruk w technologii 3D. Model jest następnie dzielony na warstwy (slicing), które określają kolejne etapy budowy obiektu w drukarce 3D.

Metody walidacji:

- Porównanie modelu CAD z chmurą punktów,
- Analiza mapy odchyłek,
- Obliczenie błędu RMS.

Cel:

- Ocena dokładności rekonstrukcji,
- Identyfikacja obszarów błędu,
- Poprawa jakości modelu.



Rys.21 Analiza odchyłek geometrycznych modelu 3D względem geometrii odniesienia. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#) ¹¹³



Zastosowania i automatyzacja



114

Implicit surfaces w rekonstrukcji 3D

Powierzchnia nie jest zapisana jako mesh, lecz jako funkcja.

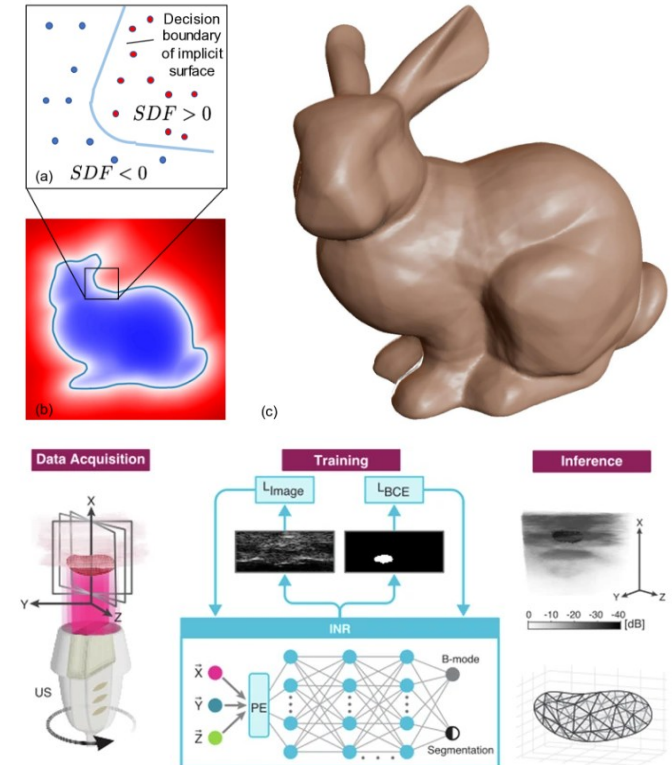
$$f(x, y, z) = 0$$

Przykłady reprezentacji:

- Signed Distance Function,
- Neural Implicit Surfaces,
- Occupancy Networks.

Zalety:

- Gładkie powierzchnie,
- Rekonstrukcja z niepełnych danych,
- Brak problemów topologicznych mesh.



Rys.22 Rekonstrukcja kształtu obiektu 3D z wykorzystaniem funkcji odległości i metod uczenia maszynowego. Źródło: [1], [2]

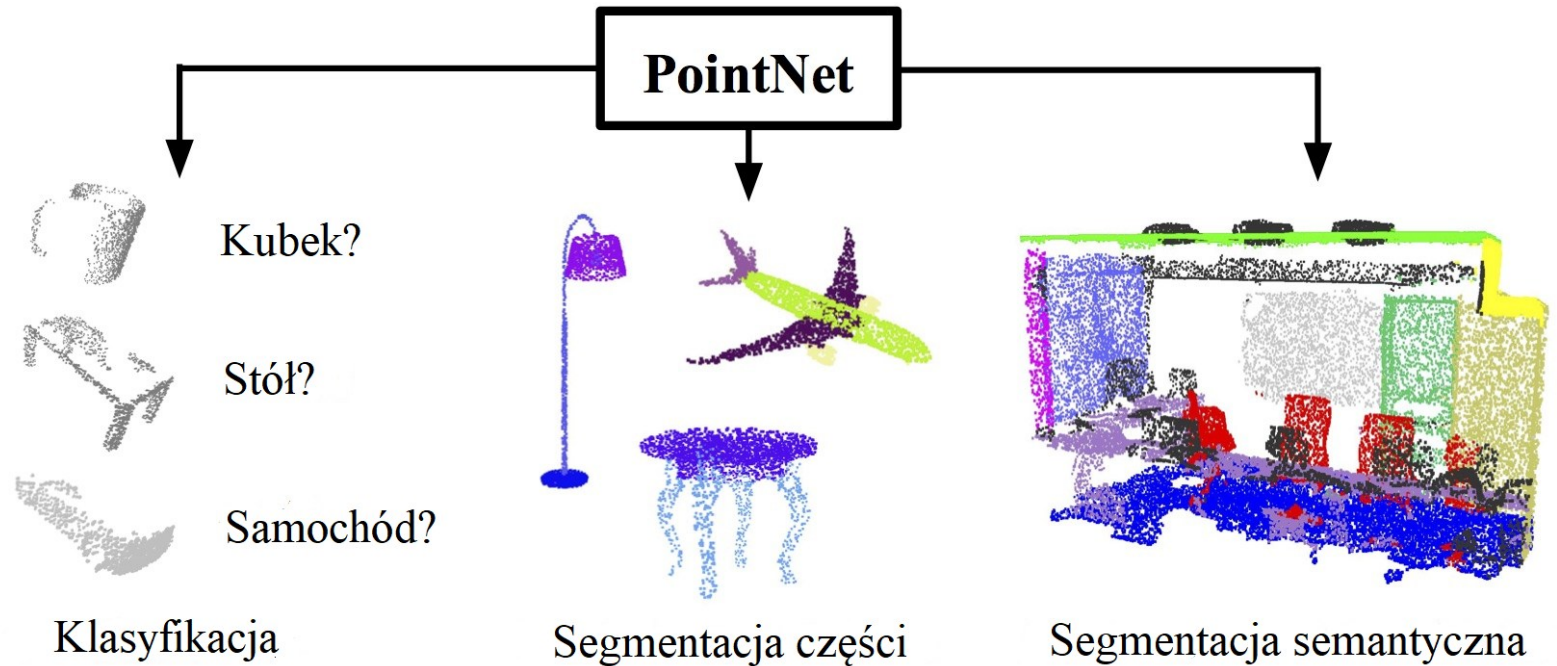


Rekonstrukcja przy pomocy sieci neuronowych

Sieci neuronowe mogą uczyć się zależności między chmurą punktów a geometrią obiektu.

Typowe modele:

- **PointNet/++** - analiza chmur punktów bezpośrednio,
- **Autoencoders/FoldingNet** - rekonstrukcja powierzchni,
- **NeRF** - rekonstrukcja 3D na podstawie obrazów



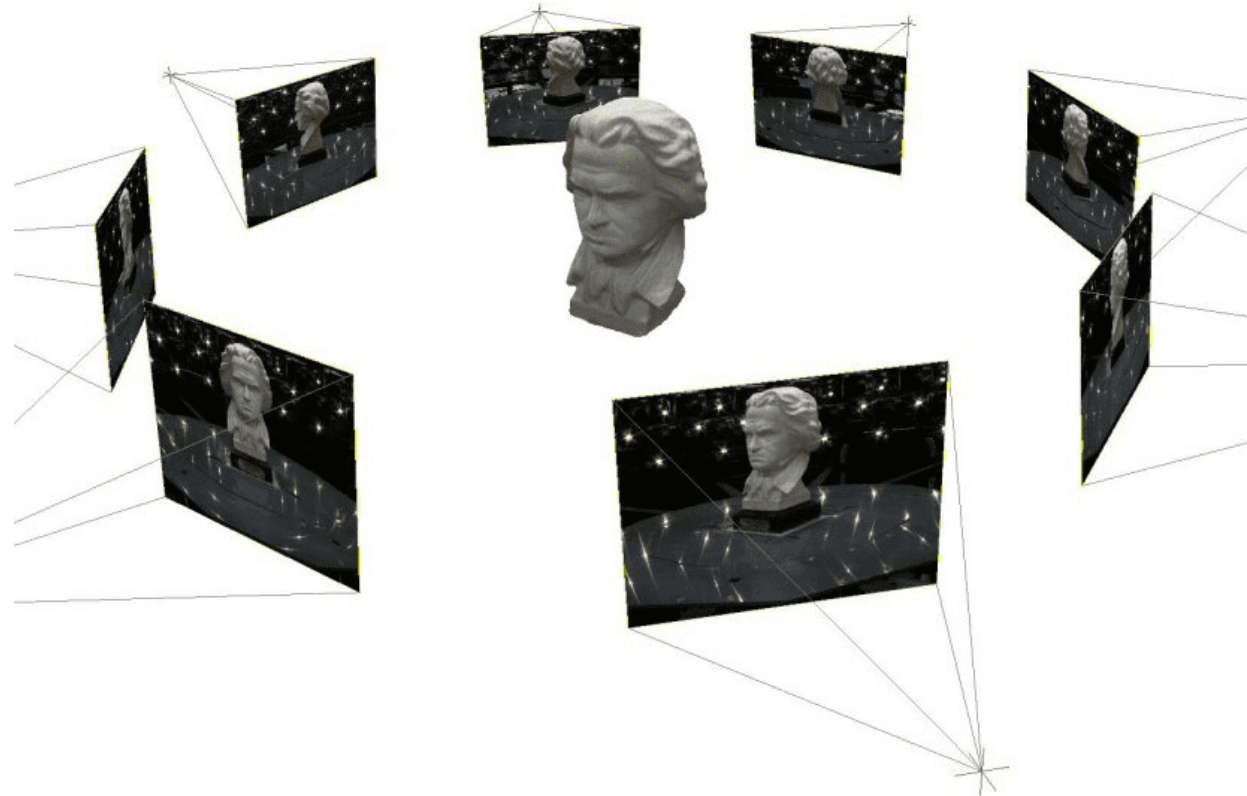
Rys.23 Zastosowania sieci PointNet do klasyfikacji i segmentacji chmur punktów. [Źródło](#) 116



Rekonstrukcja przy pomocy sieci neuronowych

Proces rekonstrukcji:

1. Wejście - chmura punktów,
2. Ekstrakcja cech geometrycznych,
3. Predykcja powierzchni,
4. Generacja modelu 3D.



Rys.24 Rekonstrukcja obiektu 3D na podstawie wielu zdjęć wykonanych z różnych kierunków. [Źródło](#)

117

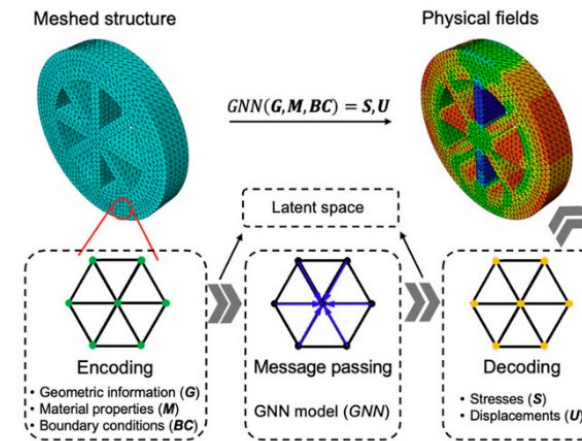
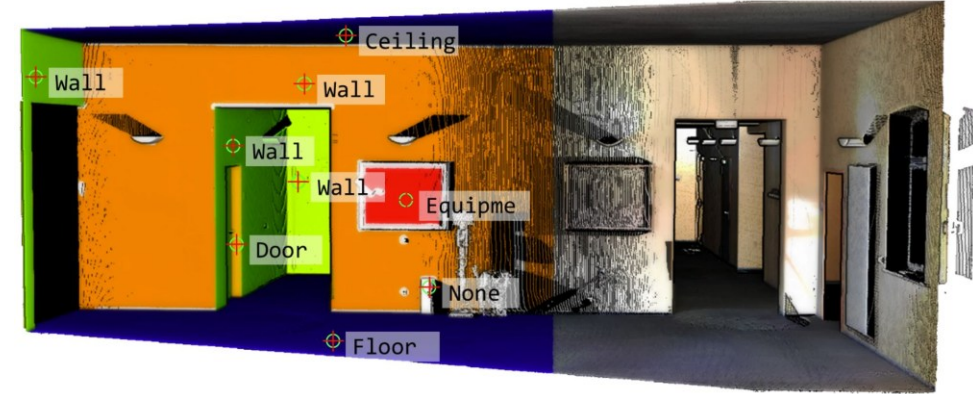


Zastosowania AI w rekonstrukcji 3D:

- Automatyczna segmentacja chmury punktów,
- Rozpoznawanie prymitywów geometrycznych,
- Rekonstrukcja powierzchni freeform,
- Uzupełnianie brakujących danych skanowania.

Typowe modele:

- CNN dla danych 3D,
- Graph Neural Networks (GNN),
- Transformer dla chmur punktów.



Rys.25 Segmentacja scen 3D oraz analiza siatek z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

118



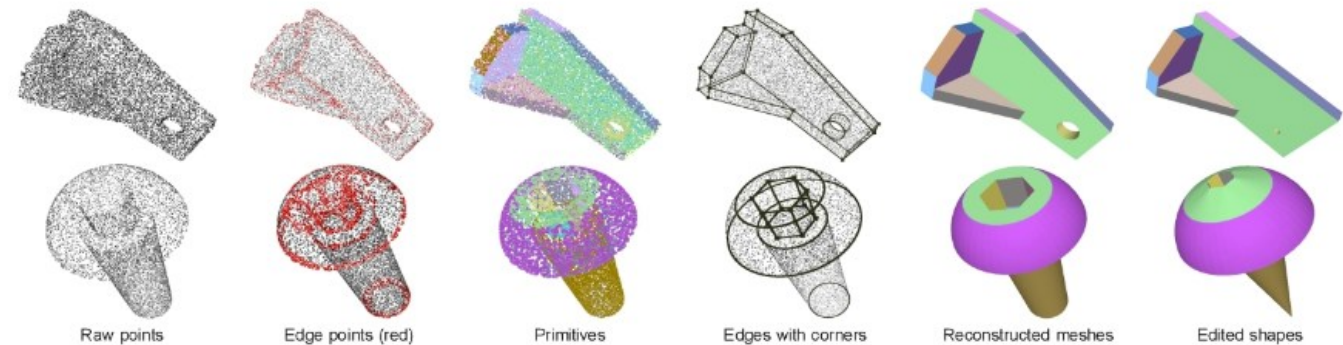
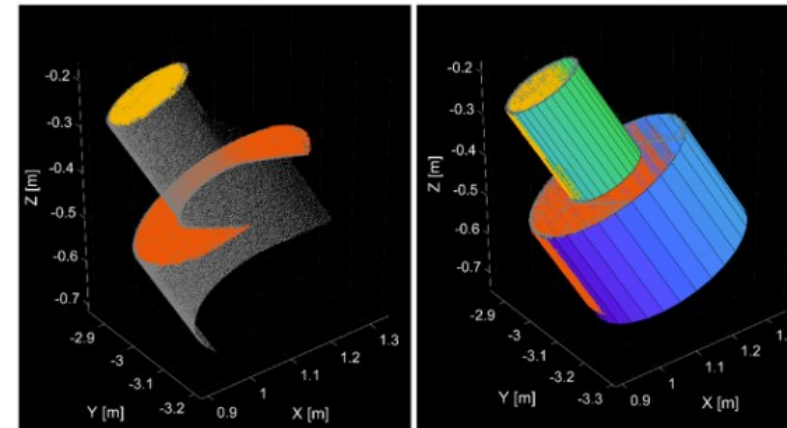
Automatyczna segmentacja powierzchni

Typowe klasy powierzchni:

- Plane - powierzchnie,
- Cylinder - powierzchnie okrągłe,
- Sphere - sfery,
- Freeform.

Metody:

- RANSAC,
- Region growing,
- Analiza krzywizny,
- Deep learning segmentation.



Rys.26 Segmentacja scen 3D oraz analiza siatek
z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

119



Dziękuję za uwagę

Wykład 4

Temat: Technologie addytywne - przegląd metod

Dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz,
Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej,
Katedra Informatyki Technicznej

1. Podstawy technologii addytywnych
2. Klasyfikacja technologii AM
3. Technologie druku 3D
4. Zastosowania i ograniczenia AM



122

Podstawy technologii addytywnych



123

Technologie addytywne (AM) umożliwiają wytwarzanie obiektów poprzez nakładanie kolejnych warstw materiału na podstawie modelu cyfrowego.

Cechy technologii AM:

- Produkcja warstwa po warstwie,
- Brak konieczności stosowania form i narzędzi,
- Możliwość wytwarzania bardzo złożonych geometrii,
- Bezpośrednie przejście z modelu CAD do produktu.



Rys.1 Schemat procesu wytwarzania przyrostowego: od modelu CAD do finalnego produktu. [Źródło](#)

124



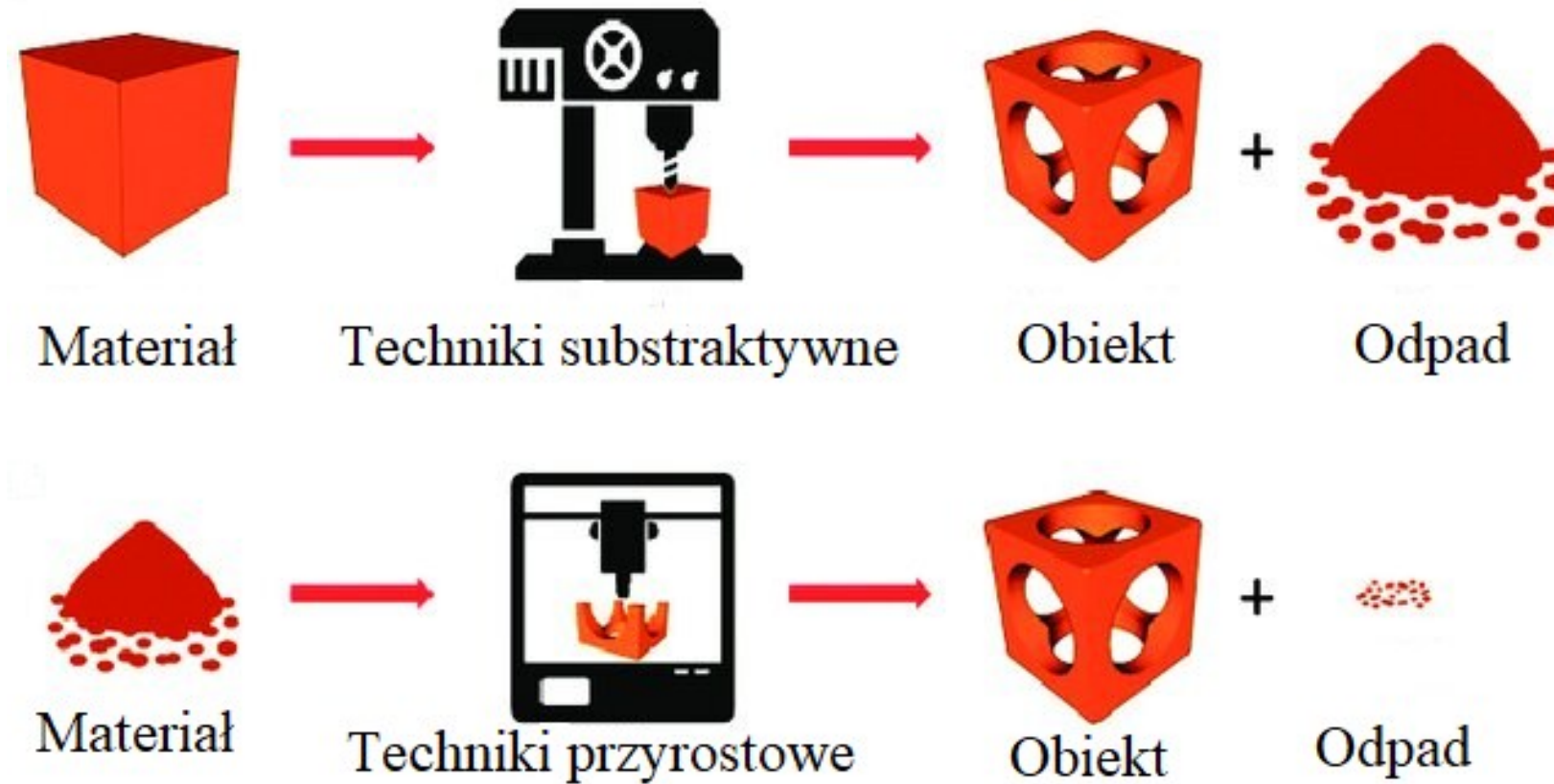
Tab.1 Porównanie produkcji tradycyjnej i technik addytywnych pod względem sposobu wytwarzania, złożoności geometrii oraz skali produkcji.

Produkcja tradycyjna	Techniki addytywne
Usuwanie materiału	Dodawanie materiału
Frezowanie	Druk 3D
Ograniczenia geometryczne	Bardzo złożone geometrie
Duża seria produkcyjna	Prototypy i małe serie

Produkcja addytywna umożliwia wytwarzanie geometrii niemożliwych do wykonania metodami konwencjonalnymi.

125





Rys.2 Porównanie technik subtraktywnych i przyrostowych pod względem sposobu formowania obiektu oraz ilości generowanego odpadu. [Źródło](#)

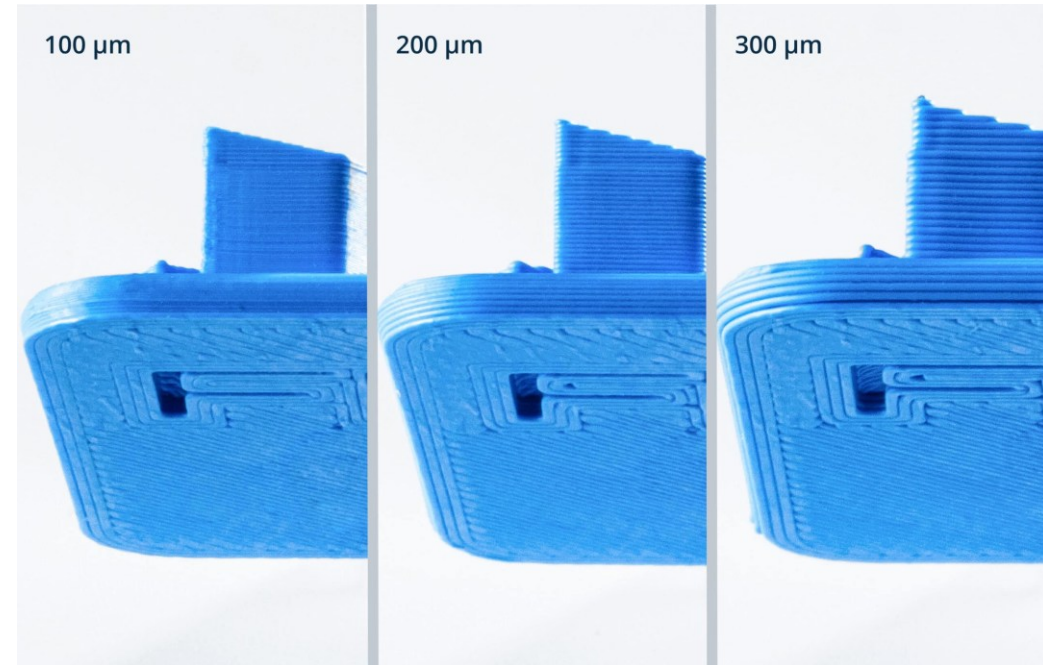
126

Główne etapy procesu AM:

- Przygotowanie modelu CAD,
- Eksport do formatu STL/AMF,
- Podział modelu na warstwy (slicing),
- Wytwarzanie warstwa po warstwie.

Ważne parametry procesu:

- Grubość warstwy,
- Orientacja modelu
- Prędkość głowicy,
- Temperatura procesu.



Rys.3 Porównanie jakości powierzchni wydruku dla różnych wysokości warstwy. [Źródło](#)

Drukarka 3D nie drukuje modelu jako całości - drukuje setki lub tysiące cienkich warstw.

127



1. Naprawa siatki STL:

- Zamknięcie otworów,
- Usuwanie błędów topologii
- Eliminacja nieciągłości.

2. Orientacja modelu:

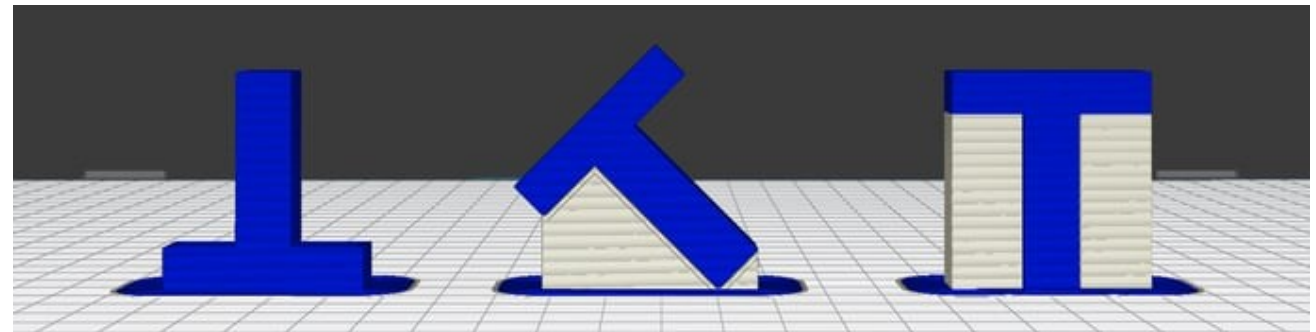
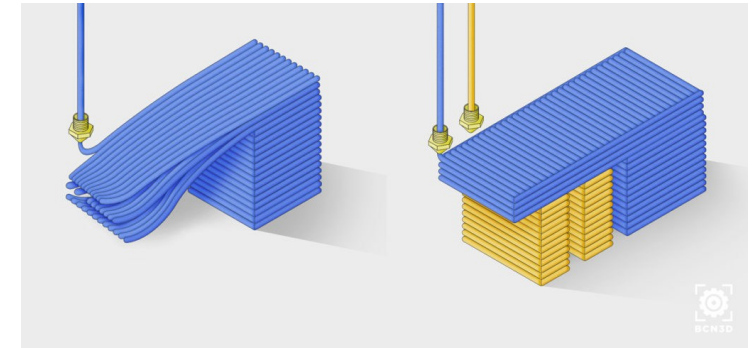
- Wpływ na jakość powierzchni,
- Liczba podpór,
- Czas druku.

3. Generowanie podpór:

- Stabilizacja modelu,
- Zapobieganie deformacji.

4. Ustawienia procesu:

- Grubość warstwy,
- Prędkość druku,
- Temperatura.



Rys.4 Przykłady geometrii wymagających struktur podporowych w procesie druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

128

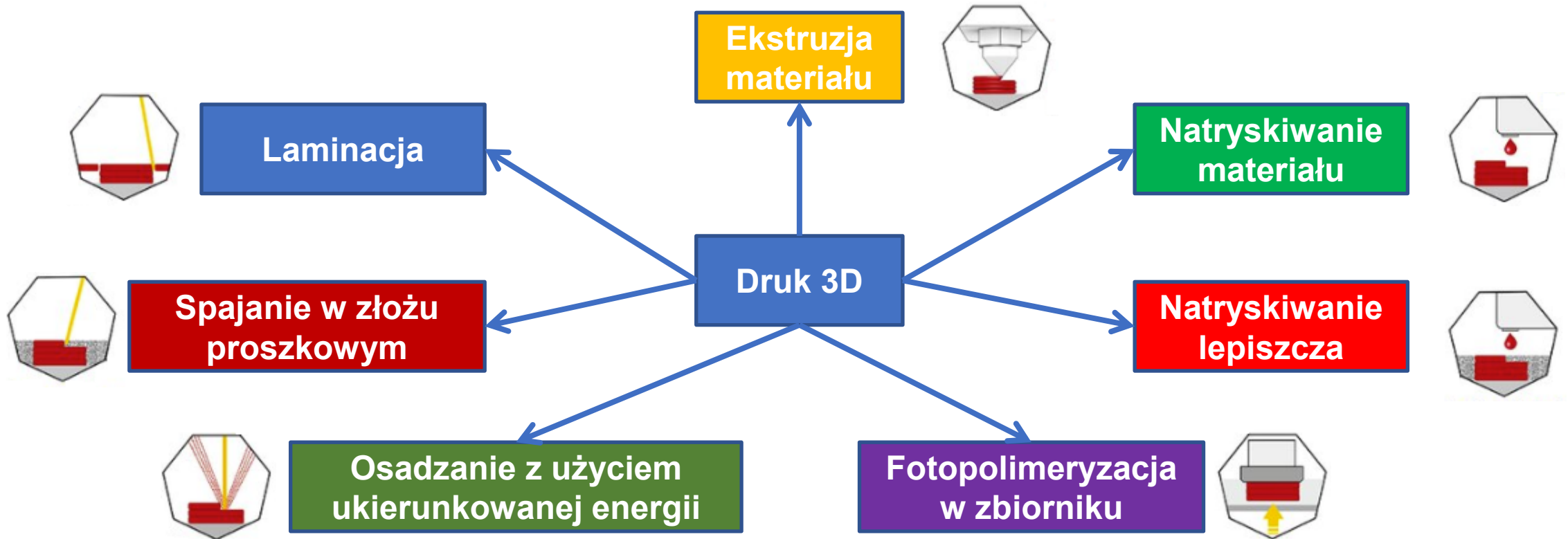


Klasyfikacja technologii AM



129

Standard ISO/ASTM 52900 definiuje siedem podstawowych kategorii technologii przyrostowych różniących się sposobem dostarczania materiału i jego utwardzania.



Rys.5 Schemat klasyfikacji metod wytwarzania przyrostowego stosowanych w druku 3D.

Tab.2 Zestawienie głównych grup procesów w technologiach addytywnych wraz z ich charakterystyką i przykładami.

Grupa procesów	Charakterystyka	Przykłady technologii
Procesy polimerowe	Utwardzanie żywic lub ekstruzja tworzyw	SLA, FDM, PolyJet
Procesy proszkowe	Selektywne spiekanie lub stapianie proszków	SLS, SLM, DMLS
Procesy natryskowe	Nanoszenie materiału lub lepiszcza	Binder Jetting, Material Jetting
Procesy energetyczne	Topienie materiału przy użyciu wiązki energii	DED, WAAM

131



Tab.3 Podział procesów druku 3D.

Materiał	Charakterystyka	Typowe technologie
Polimery	Najczęściej stosowane w prototypowaniu	FDM/FFF, SLA, SLS
Metale	Części konstrukcyjne o wysokiej wytrzymałości	SLM, DMLS
Ceramika	Wysoka odporność termiczna i chemiczna	Binder Jetting, SLA
Kompozyty	Materiały wzmacniane włóknami	FDM (włókno węglowe/szklane)
Materiały biologiczne	Zastosowania medyczne i tkankowe	Bioprinting

132

Tab.4 Zestawienie źródeł energii stosowanych w technologiach addytywnych wraz z mechanizmem działania i przykładami technologii.

Źródło energii	Mechanizm działania	Przykładowe technologie
Laser	Lokalne topienie lub spiekanie materiału	SLS, SLM, DMLS, SLA
Wiązka elektronów	Topienie materiału w próżni	EBM
Promieniowanie UV	Utwardzanie fotopolimerów	SLA, DLP
Łuk elektryczny/plazma	Topienie drutu metalowego	WAAM
Energia cieplna (grzałka)	Uplastycznianie filamentu	FDM

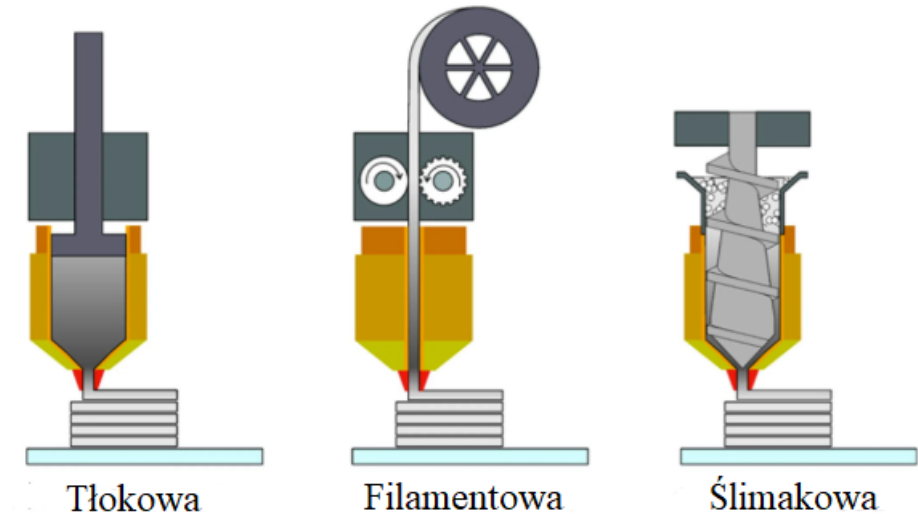
133

Ekstruzja materiału (Material Extrusion - MEX) to technologia przyrostowa, w której materiał jest podawany przez dyszę i osadzany warstwa po warstwie, tworząc trójwymiarowy obiekt. Materiał w postaci filamentu, granulatu lub pasty jest podgrzewany (w przypadku polimerów) i w sposób kontrolowany ekstrudowany na platformę roboczą zgodnie ze ścieżką generowaną z modelu CAD.

Najważniejsze cechy technologii:

- Nakładanie kolejnych warstw materiału,
- Materiał podawany przez ekstruder i dyszę,
- Proces sterowany na podstawie modelu CAD,
- Jedna z najczęściej stosowanych technologii.

Typowe materiały - PLA, ABS, PETG, nylon, Kompozyty z włóknem węglowym lub szklanym.



Rys.6 Porównanie typów głowic ekstruzyjnych w druku 3D. [Źródło](#)

134



Natryskiwanie materiału (Material jetting - MJT) to technologia przyrostowa, w której krople ciekłego materiału są selektywnie nanoszone na platformę roboczą i natychmiast utwardzane (najczęściej światłem UV), tworząc kolejne warstwy modelu.

Najważniejsze cechy technologii:

- Natryskiwanie mikrokropli materiału przez głowice drukujące,
- Utwardzanie warstw światłem UV,
- Bardzo wysoka dokładność i jakość powierzchni,
- Możliwość drukowania z wielu materiałów i w wielu kolorach jednocześnie.



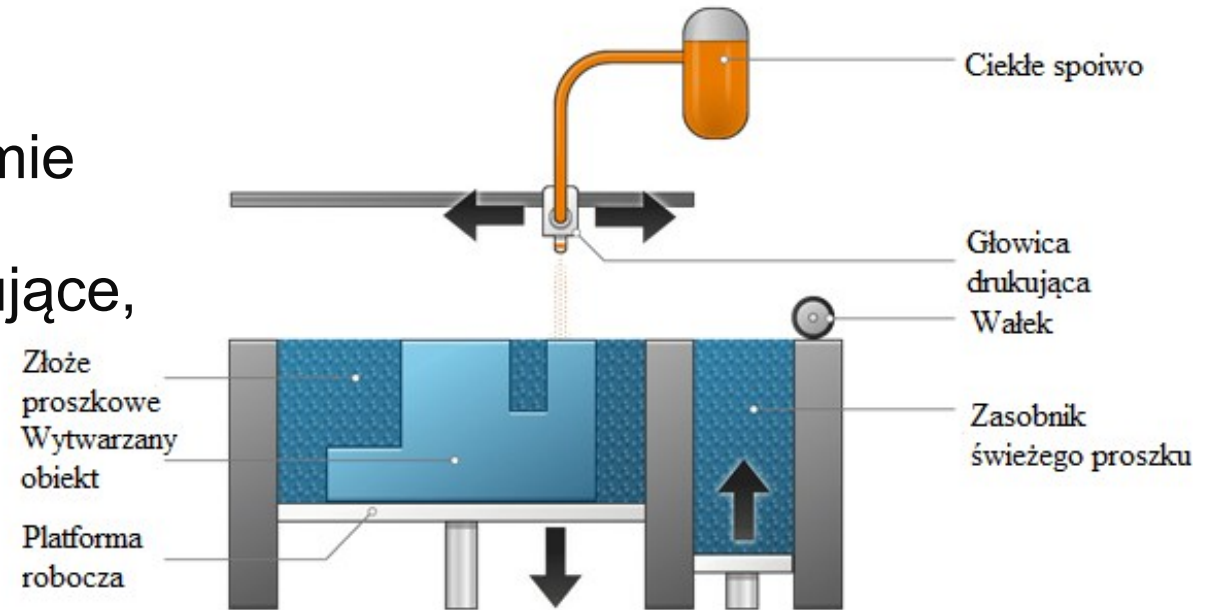
Rys.7 Przykłady metod wykańczania powierzchni wydruków 3D. [Źródło](#)

135

Natryskiwanie lepiszcza (Binder jetting - BJT) to technologia przyrostowa, w której ciekłe lepiszcze (binder) jest selektywnie natryskiwane na warstwę proszku, powodując lokalne związanie cząstek materiału i tworzenie kolejnych warstw modelu.

Najważniejsze cechy technologii:

- Warstwa proszku rozprowadzana na platformie roboczej,
- Natryskiwanie lepiszcza przez głowice drukujące,
- Brak konieczności stosowania wysokiej temperatury w trakcie wydruku,
- Po procesie wymagane jest utwardzanie lub spiekanie modelu.



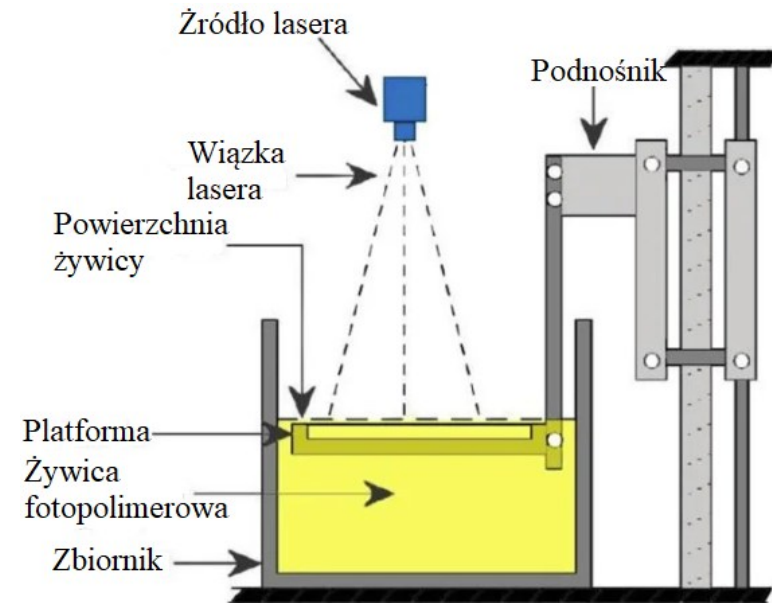
Rys.8 Schemat technologii Binder Jetting. [Źródło](#) 136



Fotopolimeryzacja w zbiorniku (Vat photopolimeryzation) to technologia przyrostowa, w której ciekła żywica fotopolimerowa jest selektywnie utwardzana za pomocą źródła światła (np. lasera lub projektora), powodując lokalną polimeryzację materiału i tworzenie kolejnych warstw modelu.

Najważniejsze cechy technologii:

- Wysoka dokładność i rozdzielczość druku,
- Bardzo gładka powierzchnia modeli,
- Materiał: żywice fotopolimerowe utwardzane Światłem UV,
- Konieczność mycia i dodatkowego utwardzania UV po druku.



Rys.9 Schemat procesu stereolitografii (SLA). [Źródło](#) 137

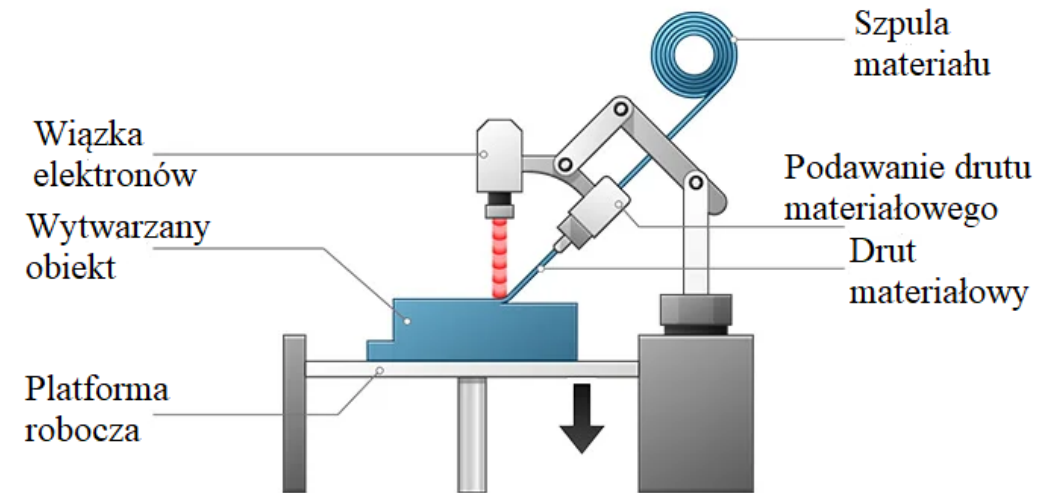


Osadzanie z użyciem ukierunkowanej energii (Directed energy deposition)

to technologia przyrostowa, w której materiał (proszek lub drut metalowy) jest podawany do strefy działania skoncentrowanego źródła energii, gdzie ulega stopieniu i osadza się na powierzchni, tworząc kolejne warstwy modelu.

Najważniejsze cechy technologii:

- Wykorzystanie lasera, wiązki elektronów lub łuku elektrycznego,
- Jednoczesne podawanie materiału i jego topienie,
- Możliwość naprawy i regeneracji elementów,
- Stosowana głównie do metali i stopów metalicznych



Rys.10 Schemat technologii DED z podawaniem drutu. ¹³⁸

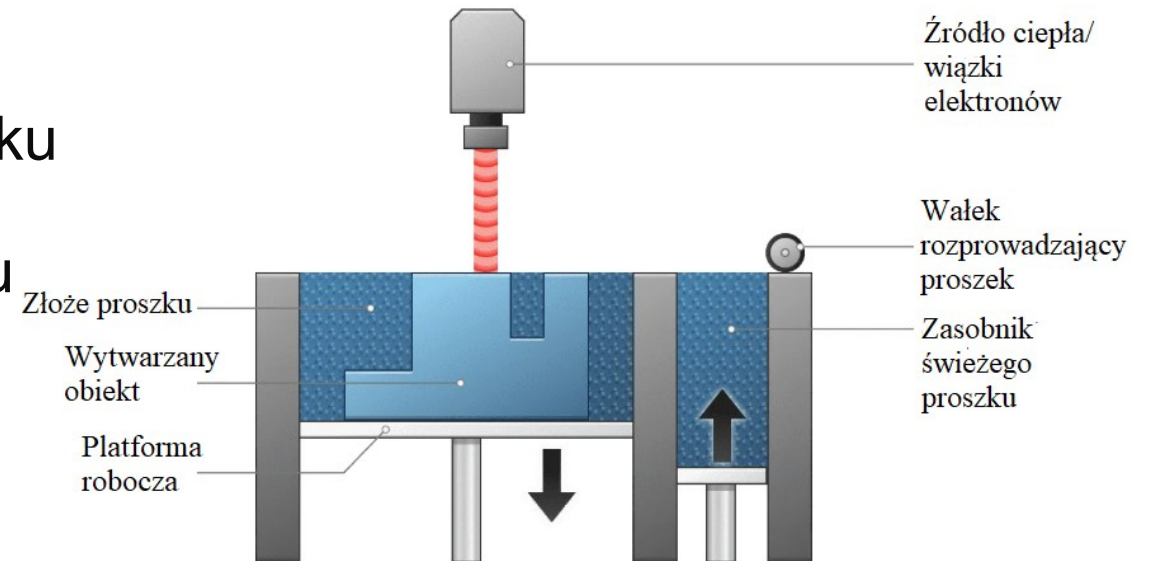
Źródło



Spajanie w złożu proszkowym (Powder Bed Fusion) to technologia przyrostowa, w której cienka warstwa proszku jest selektywnie spajana lub stapiana przez źródło energii, tworząc kolejne warstwy modelu.

Najważniejsze cechy technologii:

- Równomierne rozpraszanie warstw proszku na platformie roboczej,
- Selektywne spiekanie lub topnienie materiału laserem lub wiązką elektronów,
- Wysoka dokładność i dobre właściwości mechaniczne elementów,
- Stosowana dla metali, polimerów oraz ceramiki.



Rys.11 Schemat technologii proszkowej w druku 3D.

[Źródło](#)

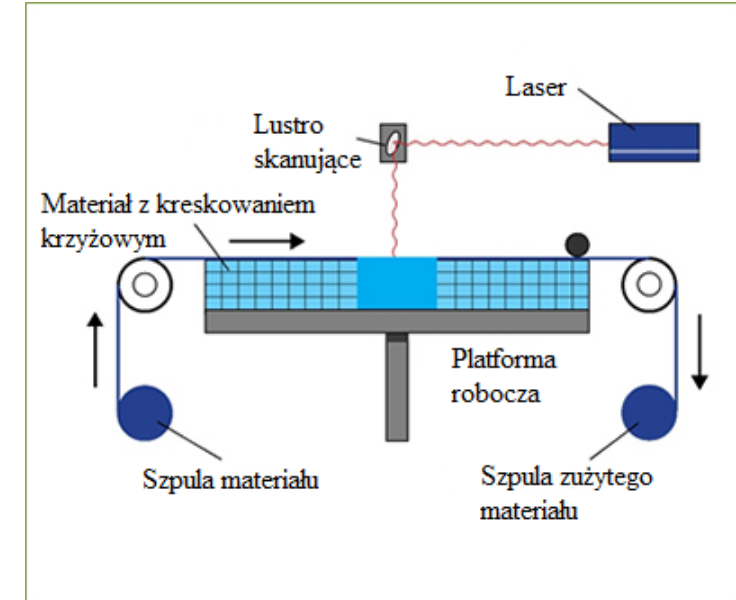
139



Laminacja arkuszy (Sheet Lamination) to technologia przyrostowa, w której kolejne warstwy materiału w postaci arkuszy są łączone ze sobą (np. klejeniem, zgrzewaniem lub ultradźwiękami), a następnie wycinane do odpowiedniego kształtu.

Najważniejsze cechy technologii:

- Wykorzystanie cienkich arkuszy materiału,
- Łączenie warstw poprzez klejenie, zgrzewanie lub ultradźwięki,
- Kształt elementu uzyskiwany przez cięcie laserowe lub mechaniczne,
- Możliwość stosowania metali, papieru lub tworzyw sztucznych.



Rys.12 Schemat procesu laminacji w druku 3D.¹⁴⁰

[Źródło](#)



Tab.5 (cz.1) Porównanie wybranych technologii addytywnych pod względem materiału, mechanizmu działania, dokładności oraz zastosowań.

Technologia AM	Materiał	Źródło energii/mechanizm	Dokładność	Typowe zastosowania
Ekstruzja materiału	Filamenty polimerowe	Podgrzewana dysza wyciska materiał	Średnia	Prototypy, modele funkcjonalne
Natryskiwanie materiału	Ciekłe fotopolimery	Głowica natryskowa + UV	Bardzo wysoka	Modele wizualne, prototypy o wysokiej jakości
Natryskiwanie lepiszcza	Proszki: metal, ceramika, piasek	Natryskiwanie ciekłego spoiwa	Średnia	Formy odlewnicze, części metalowe po spierkaniu
Fotopolimeryzacja w zbiorniku	Żywice fotopolimerowe	Laser/projektor UV	Bardzo wysoka	Precyzyjne prototypy, medycyna, stomatologia

141



Tab.5 (cz.2) Porównanie wybranych technologii addytywnych pod względem materiału, mechanizmu działania, dokładności oraz zastosowań.

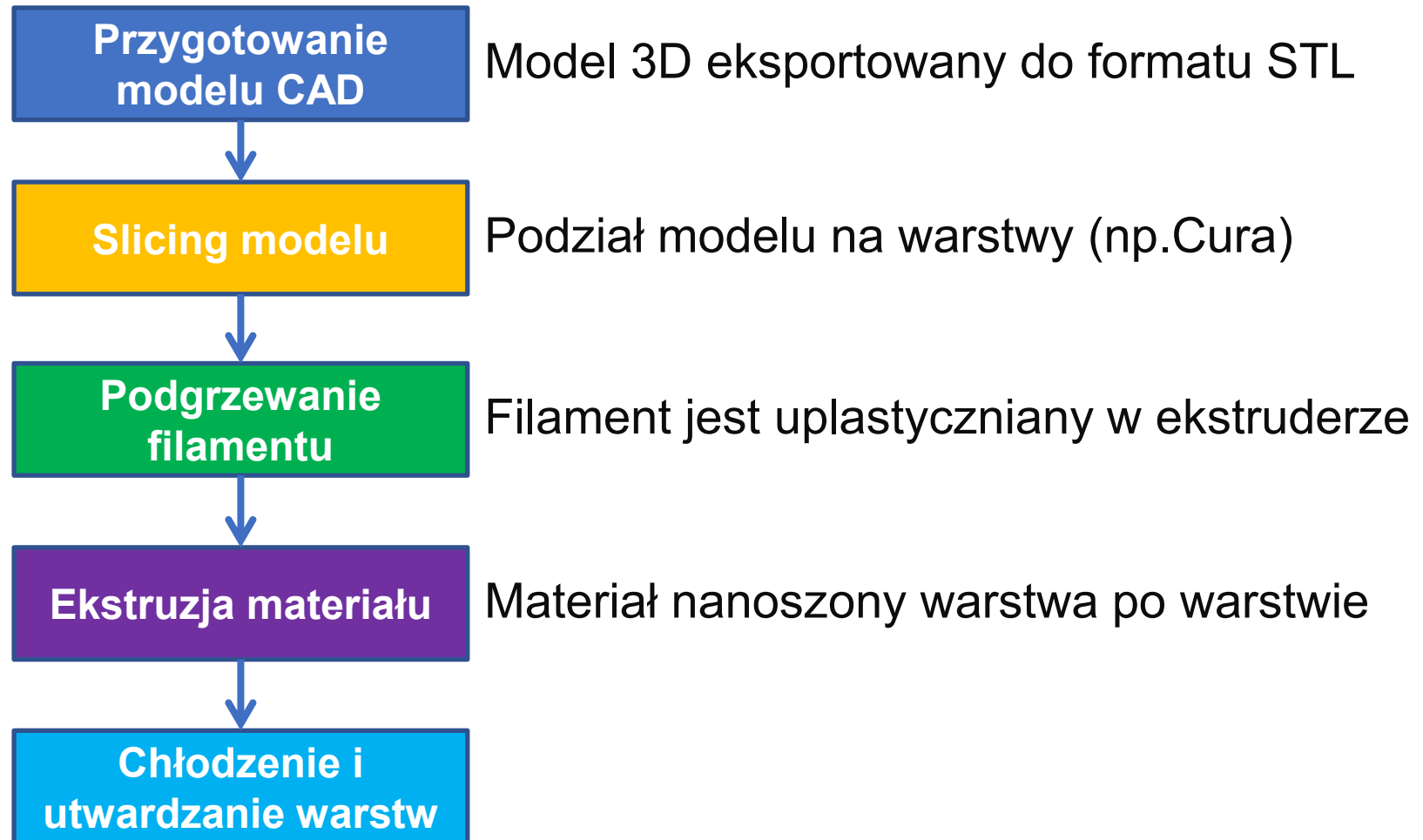
Technologia AM	Materiał	Źródło energii/mechanizm	Dokładność	Typowe zastosowania
Osadzanie z użyciem ukierunkowanej energii	Proszek lub drut metalowy	Laser / wiązka elektronów / plazma	Średnia	Naprawa i regeneracja części metalowych
Spajanie w złożu proszkowym	Proszki metalowe lub polimerowe	Laser lub wiązka elektronów	Wysoka	Elementy lotnicze, medyczne, funkcjonalne części
Laminacja arkuszy	Arkusze papieru, metalu, polimeru	Klejenie + cięcie	Średnia	Modele koncepcyjne, wizualne



Technologie druku 3D

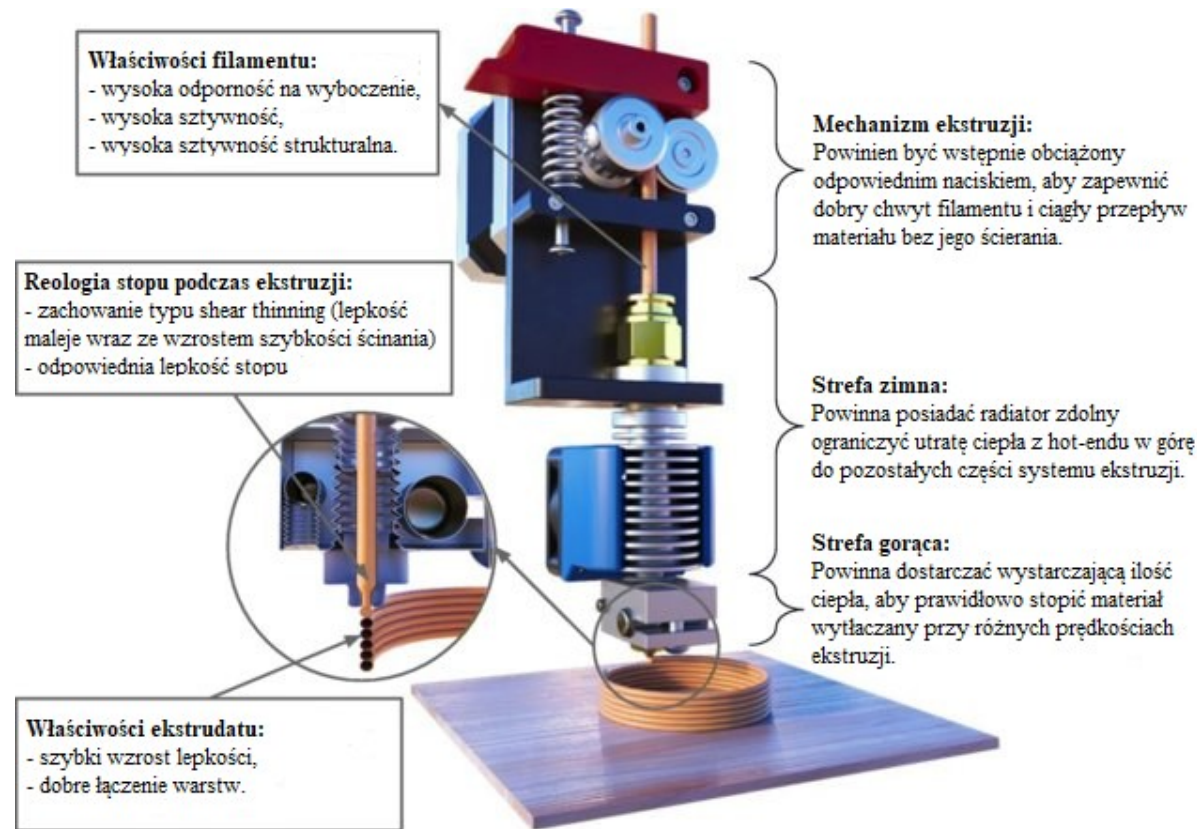


143



Rys.13 Etapy procesu druku 3D w technologii FDM.

Mechanizm ekstruzji filamentu w technologii FDM/FFF



Rys.14 Schemat budowy ekstrudera w technologii FDM. [Źródło](#)

Tab.6 (cz.1) Materiały polimerowe w druku 3D FDM.

Materiał	Pełna nazwa	Temperatura dyszy [°C]	Główne właściwości	Typowe zastosowania
PLA	Polylactic Acid	180-220	łatwy druk, mała deformacja	modele koncepcyjne, prototypy
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	220-250	wysoka wytrzymałość, odporność na temperaturę	obudowy, części techniczne
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol	220-250	dobra wytrzymałość, odporność chemiczna	elementy użytkowe



Tab.6 (cz.2) Materiały polimerowe w druku 3D FDM.

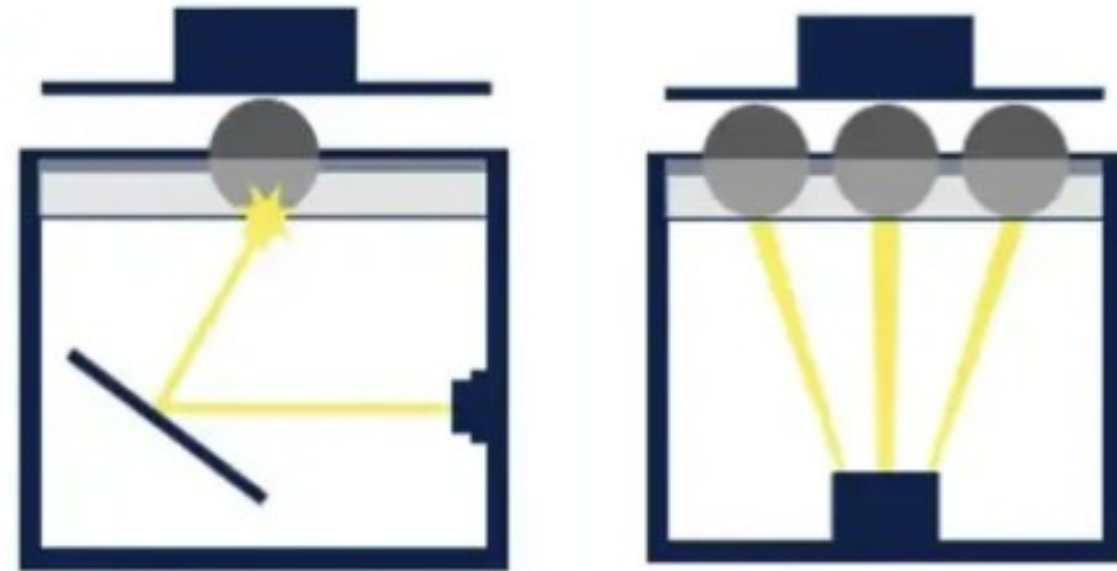
Materiał	Pełna nazwa	Temperatura dyszy [°C]	Główne właściwości	Typowe zastosowania
Nylon (PA)	Polyamide	240-270	dobra wytrzymałość, odporność chemiczna	części mechaniczne
TPU/TPE	Elastomery termoplastyczne	210-240	elastyczność, odporność na uderzenia	uszczelki, elementy elastyczne
Kompozyty	np. PLA + włókno węglowe	200-240	wysoka sztywność i niska masa	lekkie elementy konstrukcyjne



Fotopolimeryzacja w zbiorniku to proces, w którym ciekła żywica fotopolimerowa jest selektywnie utwardzana światłem UV (laser lub projektor), tworząc kolejne warstwy modelu.

Najważniejsze cechy:

- Bardzo wysoka rozdzielczość druku,
- Gładka powierzchnia modeli,
- Materiały: żywice fotopolimerowe,
- Wymagane mycie i post-utwardzanie



Rys.15 Schemat dwóch sposobów naświetlania warstwy w druku 3D. [Źródło](#)

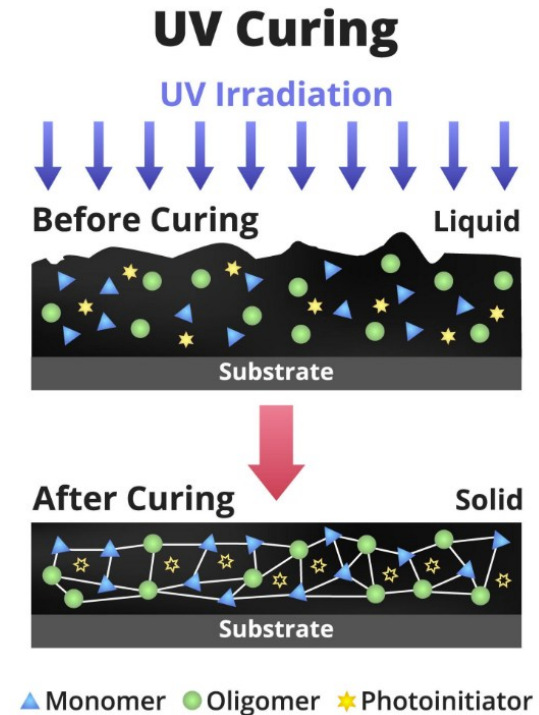
148



Proces utwardzania polega na inicjowanej światłem UV reakcji polimeryzacji, w której ciekłe monomery tworzą usieciowaną strukturę polimerową.

Etapy:

- Ekspozycja żywicy na światło UV,
- Aktywacja fotoinicjatora,
- Polimeryzacja materiału,
- Dodatkowe utwardzanie UV po wydruku.



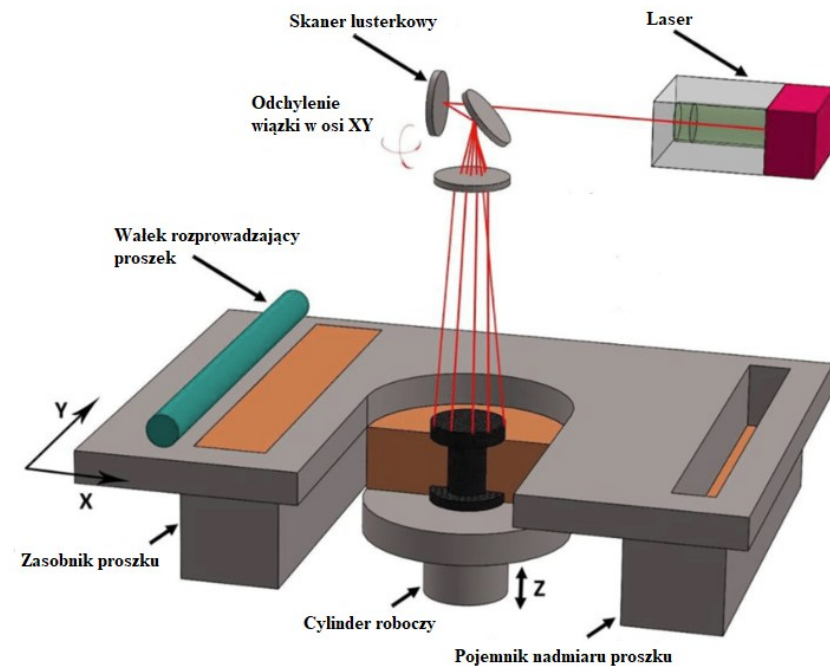
Rys.16 Mechanizm utwardzania fotopolimeru promieniowaniem UV. [Źródło](#) 149



Spiekanie laserowe w złożu proszkowym to technologia, w której warstwa proszku polimerowego jest selektywnie spiekana laserem, tworząc kolejne warstwy modelu.

Cechy technologii:

- Brak konieczności podpór,
- Dobre właściwości mechaniczne części,
- Materiały PA12, nylon, kompozyty,
- Wysoka powtarzalność produkcji.



Rys.17 Schemat technologii laserowego przetwarzania proszku. [Źródło](#)

150



Tab.7 (cz.1) Charakterystyka przykładowych stopów metali wykorzystywanych w technologiach wytwarzania przyrostowego.

Materiał	Przykładowy stop	Temperatura topnienia [°C]	Główne właściwości	Typowe zastosowania
Stale nierdzewne	316L	1370-1400	Dobra wytrzymałość, odporność na korozję, dobra drukowalność	Elementy przemysłowe, prototypy funkcjonalne
Stale narzędziowe	Maraging Steel	1410	Bardzo wysoka wytrzymałość, możliwość obróbki cieplnej	Formy wtryskowe, narzędzia produkcyjne
Stopy tytanu	Ti-6Al-4V	1600-1660	Wysoka wytrzymałość przy niskiej masie, biokompatybilność	Implanty medyczne, lotnictwo



Tab.7 (cz.2) Charakterystyka przykładowych stopów metali wykorzystywanych w technologiach wytwarzania przyrostowego.

Materiał	Przykładowy stop	Temperatura topnienia [°C]	Główne właściwości	Typowe zastosowania
Stopy aluminium	AlSi10Mg	570-590	Niska masa, dobra przewodność cieplna	Przemysł motoryzacyjny, lotniczy
Stopy niklu	Inconel 718	1260-1336	Odporność na wysoką temperaturę i korozję	Turbiny gazowe, przemysł energetyczny
Stopy kobaltu	Co-Cr	1300-1450	Bardzo wysoka odporność na zużycie	Implanty dentystyczne, elementy medyczne



Zastosowania i ograniczenia AM

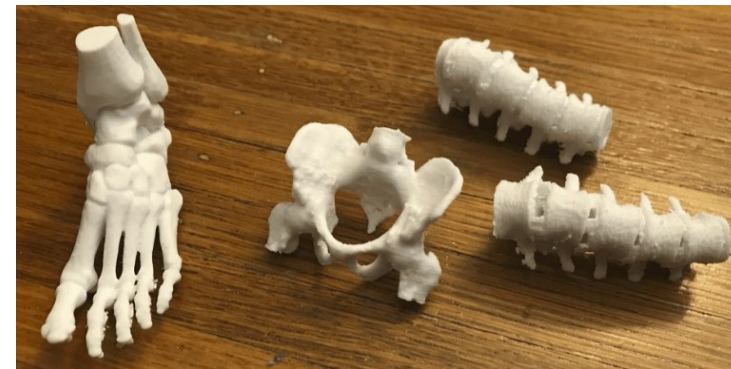
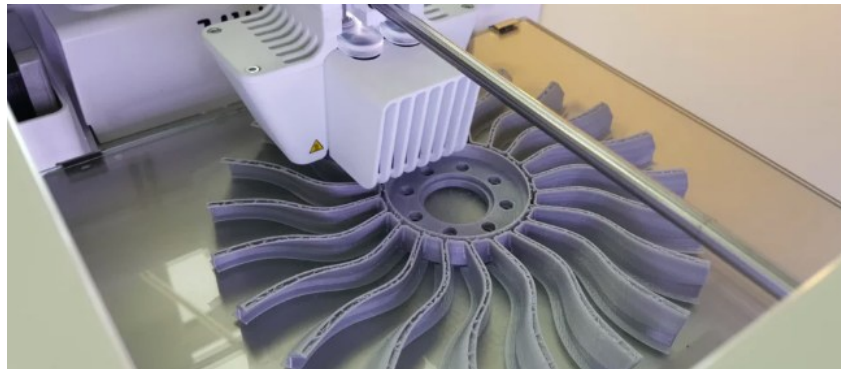


153

Technologie addytywne znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu dzięki możliwości wytwarzania złożonych geometrii oraz szybkiej produkcji elementów.

Główne obszary zastosowań:

- **Prototypowanie** – szybkie tworzenie modeli koncepcyjnych i funkcjonalnych,
- **Przemysł lotniczy i kosmiczny** – lekkie elementy konstrukcyjne,
- **Medycyna** – implanty, protezy, modele anatomiczne,
- **Motoryzacja i przemysł** – części funkcjonalne oraz narzędzia produkcyjne.



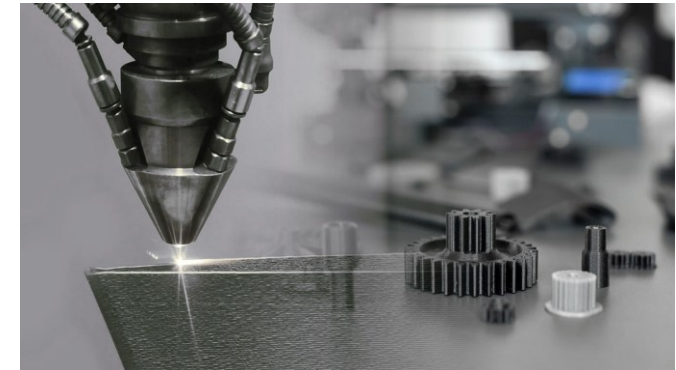
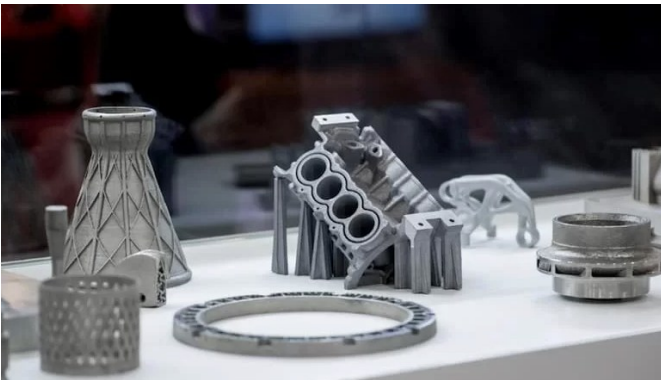
154

Rys.18 Wybrane zastosowania technologii druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Technologie przyrostowe są coraz częściej stosowane w nowoczesnym przemyśle jako uzupełnienie tradycyjnych metod wytwarzania.

Najważniejsze zastosowania przemysłowe:

- **Szybkie prototypowanie (rapid prototyping)** - weryfikacja projektów,
- **Produkcja krótkoseryjna (rapid manufacturing)** - wytwarzanie części końcowych,
- **Narzędzia produkcyjne (rapid tooling)** - formy, uchwyty, przyrządy montażowe,
- **Regeneracja elementów (repair & remanufacturing)** - naprawa zużytych części.



155

Rys.19 Zastosowania druku 3D metali. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

Technologie addytywne umożliwiają wytwarzanie elementów o złożonych geometriach przy jednoczesnym ograniczeniu strat materiałowych i skróceniu czasu produkcji.

Najważniejsze zalety:

1. **Wysoka złożoność geometryczna** - możliwość tworzenia struktur kratowych i kanałów wewnętrznych.
2. **Redukcja masy elementów** - projektowanie zoptymalizowane topologicznie.
3. **Ograniczenie strat materiałowych** - materiał wykorzystywany tylko tam, gdzie jest potrzebny.
4. **Szybkie prototypowanie** - krótszy czas projektowania i testowania.
5. **Integracja wielu części w jeden element** - uproszczenie konstrukcji.



Pomimo wielu zalet technologie addytywne posiadają również istotne ograniczenia technologiczne i ekonomiczne.

Najważniejsze ograniczenia:

1. **Wysoki koszt urządzeń i materiałów** - szczególnie w technologiach metalowych.
2. **Ograniczona prędkość produkcji** - nie zawsze opłacalne w produkcji masowej.
3. **Wymagana obróbka końcowa** - obróbka cieplna, usuwanie podpór.
4. **Anizotropia właściwości materiału** - różnice wytrzymałości w zależności od kierunku druku.
5. **Ograniczenia wymiarowe elementów** - wynikające z objętości roboczej urządzenia.

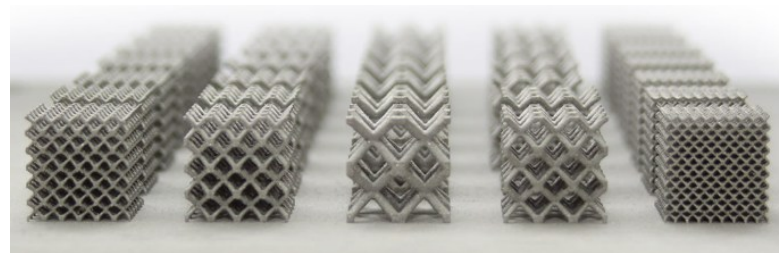


Rys.20 Przykłady zastosowań i post-processingu w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#)

Technologie addytywne dynamicznie się rozwijają i coraz częściej znajdują zastosowanie w zaawansowanych gałęziach przemysłu.

Najważniejsze kierunki rozwoju:

1. **Produkcja seryjna** - zastosowanie AM w produkcji przemysłowej na większą skalę,
2. **Nowe materiały** - rozwój stopów metali, kompozytów i materiałów funkcjonalnych,
3. **Integracja z przemysłem 4.0/5.0** - cyfrowe projektowanie i monitorowanie procesu druku,
4. **Bioprinting** - druk struktur biologicznych i tkanek,
5. **Druk wielomateriałowy** - możliwość łączenia różnych materiałów w jednym procesie.



Rys.21 Różnorodne zastosowania druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

Technologie addytywne stanowią nowoczesną metodę wytwarzania umożliwiającą produkcję złożonych elementów bez konieczności stosowania form i narzędzi.

Najważniejsze wnioski:

- Wytwarzanie addytywne umożliwia wytwarzanie złożonych geometrii niedostępnych dla metod tradycyjnych,
- W technologii przyrostowej stosuje się różne procesy druku 3D, np.: FDM, SLA, SLM, DED czy Binder Jetting,
- Materiały stosowane w AM obejmują polimery, metale, ceramikę oraz kompozyty,
- Technologie przyrostowe znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle, medycynie i lotnictwie,
- Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych wskazuje na ich rosnącą rolę w nowoczesnej produkcji.

159



Dziękuję za uwagę

Wykład 5

Temat: Projektowanie pod technologie addytywne i optymalizacja

Dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz,
Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej,
Katedra Informatyki Technicznej

1. Projektowanie pod technologie addytywne
2. Zaawansowane metody projektowania
3. Wdrożenie technologii addytywnych w przemyśle



162

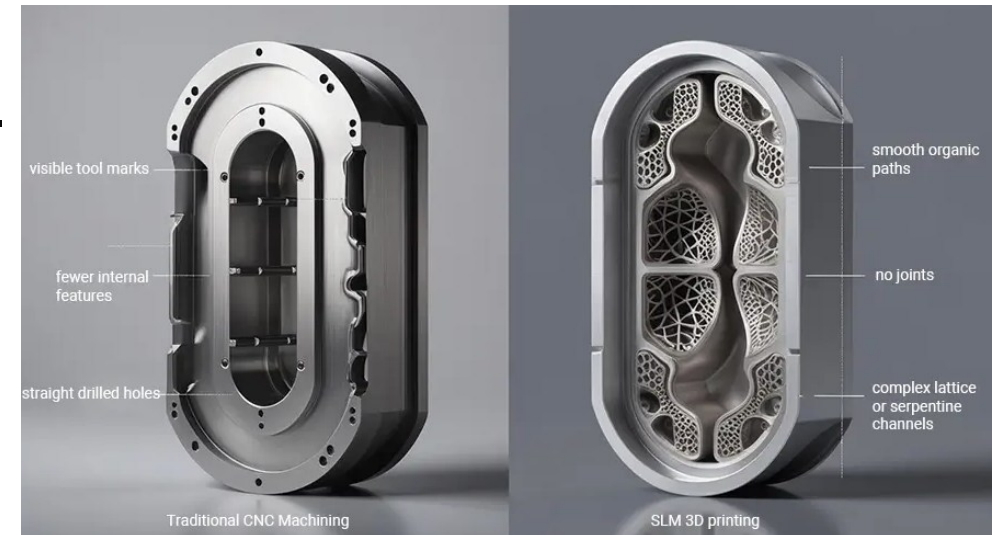
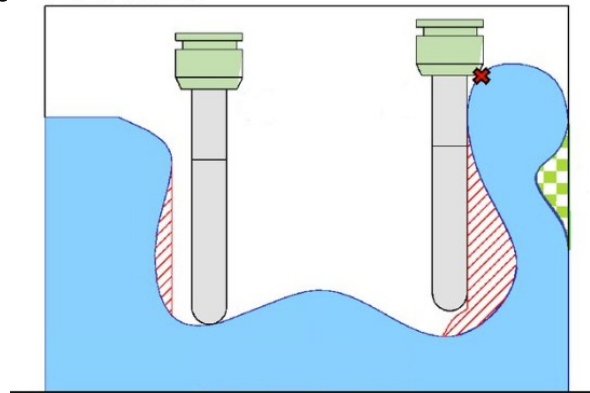
Projektowanie pod technologie addytywne



163

Projektowanie w tradycyjnej produkcji jest silnie ograniczone przez możliwości narzędzi obróbczych. Dostęp narzędzia, kierunki obróbki oraz geometria frezów powodują, że wiele złożonych kształtów jest trudnych lub kosztownych do wykonania. Do ograniczeń możemy zaliczyć:

- Dostęp do narzędzia ogranicza geometrię części,
- Złożone kształty zwiększają koszt produkcji,
- Konieczność montażu wielu komponentów,
- Projekt zależy od narzędzi i technologii obróbki.



Rys.1 Porównanie możliwości wytwarzania geometrii złożonych. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Swoboda projektowania w technologiach addytywnych

Technologie addytywne umożliwiają projektowanie geometrii, które są trudne lub niemożliwe do wykonania metodami konwencjonalnymi. Dzięki budowie warstwowej możliwe jest tworzenie struktur wewnętrznych, kanałów funkcjonalnych oraz kształtów optymalizowanych pod względem wytrzymałości i masy.

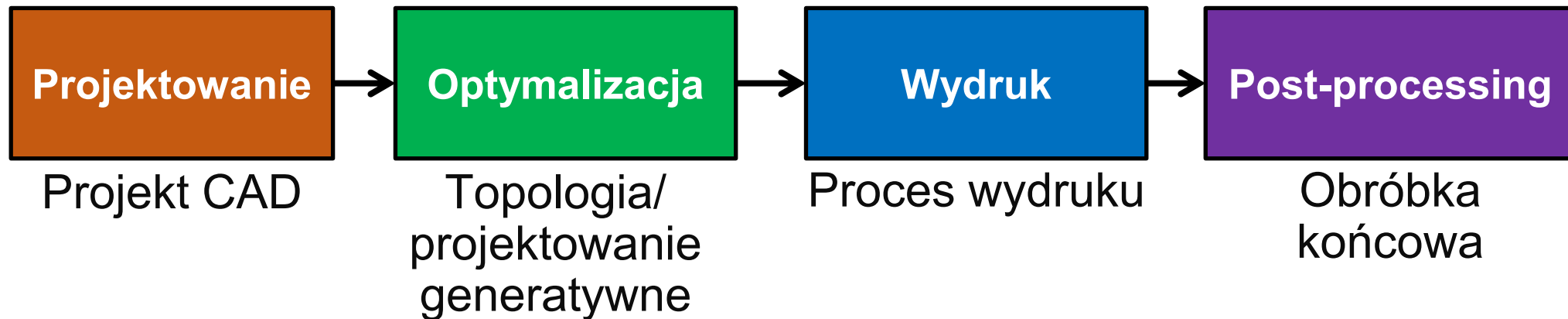
- Produkcja warstwowa umożliwia złożone geometrie,
- Możliwe jest wykonanie wewnętrznych kanałów funkcjonalnych (np. chłodzących),
- Możliwe jest wykonanie ograniczonych kształtów i optymalizacja topologiczna,
- Integracja funkcji pozwala zmniejszyć liczbę operacji.



Rys.2 Przykłady struktur lekkich w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Design for Additive Manufacturing (DfAM) to podejście projektowe, w którym geometria części jest optymalizowana specjalnie pod kątem technologii addytywnych.

- DfAM - projektowanie zoptymalizowane dla technologii addytywnych,
- Uwzględnia orientację druku i proces budowy warstwowej,
- Minimalizuje konieczność stosowania podpór,
- Optymalizuje masę i właściwości mechaniczne elementu,
- Umożliwia integrację wielu funkcji w jednym komponencie.



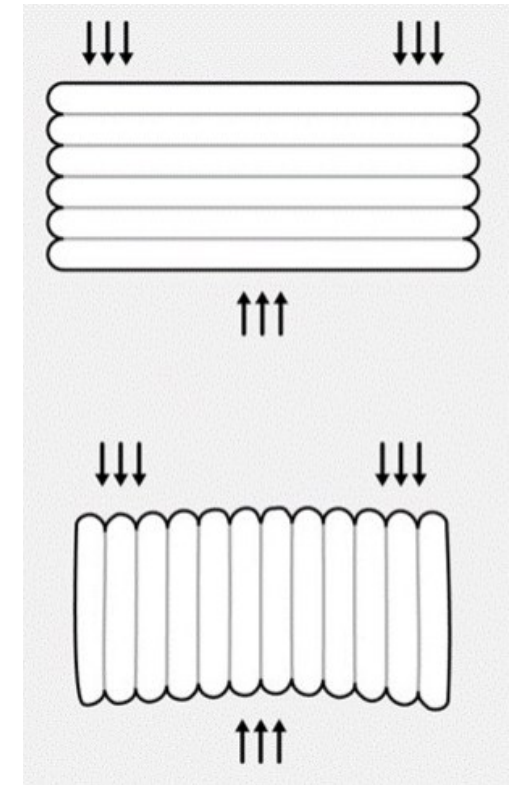
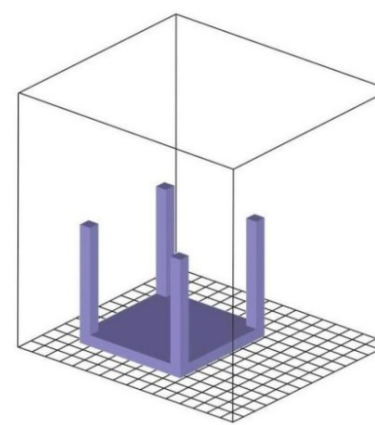
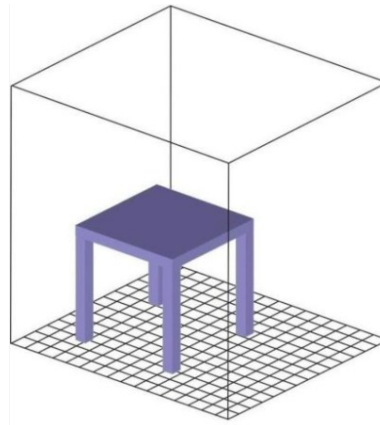
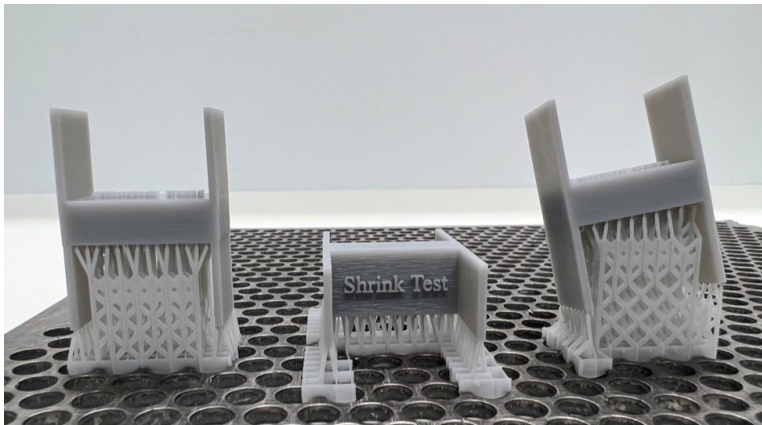
Rys.3 Główne etapy procesu wytwarzania przyrostowego: projektowanie, optymalizacja, wydruk i post-processing.

166



Orientacja elementu w komorze roboczej jest jednym z kluczowych parametrów wpływających na jakość, wytrzymałość oraz czas procesu druku 3D.

- Orientacja wpływa na jakość powierzchni (efekt warstwowania),
- Wpływa na właściwości mechaniczne elementu,
- Decyduje o ilości wymaganych podpór,
- Wpływa na czas budowy i zużycie materiału.

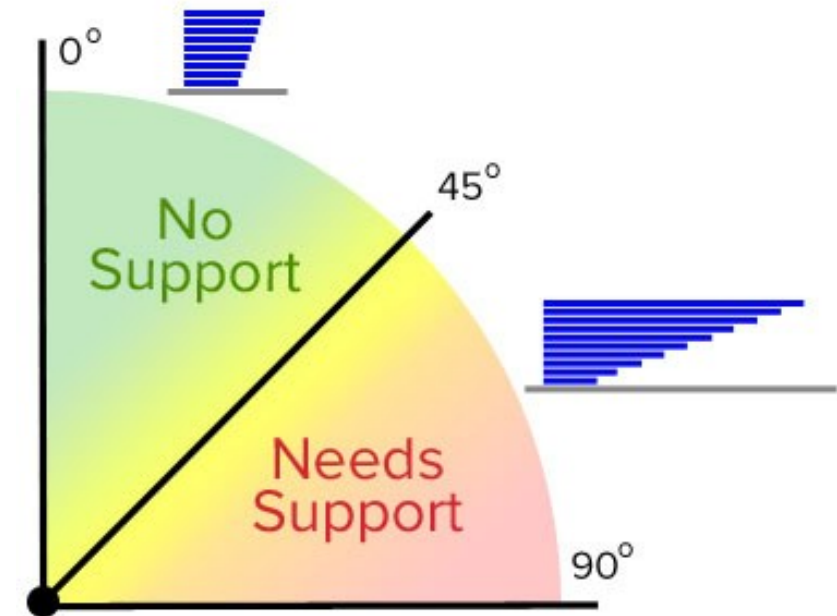


167

Rys.4 Wpływ orientacji modelu na przebieg procesu druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

W procesach addytywnych elementy o dużym kącie nachylenia względem platformy roboczej wymagają zastosowania struktur podporowych.

- Geometrie nadwieszane wymagają zastosowania podpór,
- Typowy limit technologiczny wynosi około 45° ,
- Podpory zwiększają zużycie materiału,
- Podpory wydłużają czas post-processingu.

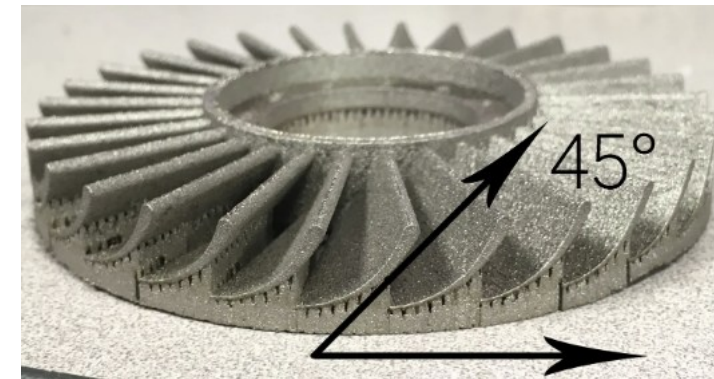


Rys.5 Kąt nawisu a potrzeba stosowania podpór. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Odpowiednie projektowanie części w technologii AM pozwala ograniczyć liczbę struktur podporowych, co zmniejsza zużycie materiału oraz czas post-processingu.

Dobre praktyki w stosowaniu podpór:

- Odpowiednia orientacja modelu w przestrzeni roboczej,
- Stosowanie geometrii samonośnych,
- Projektowanie powierzchni nachylonych zamiast poziomych,
- Wykorzystanie struktur kratowych (lattice).



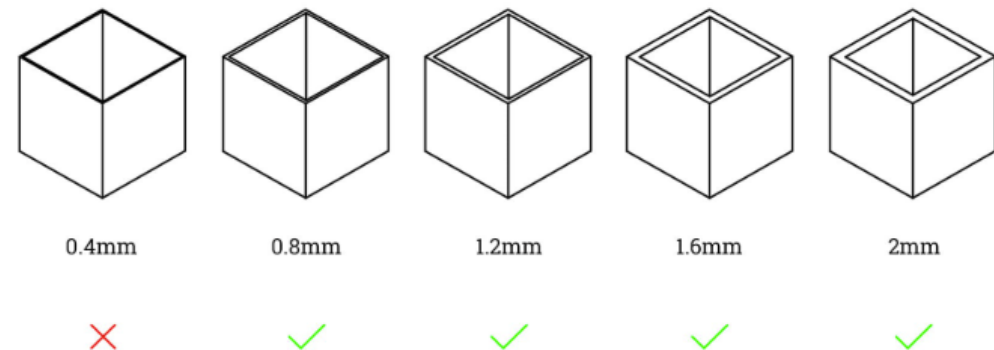
Rys.6 Podpory i orientacja modelu w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Minimalna grubość ścian jest jednym z podstawowych parametrów projektowych w technologii przyrostowej i zależy od zastosowanego procesu druku.

- minimalna grubość ścian zależy od technologii druku,
- zbyt cienkie ściany mogą nie zostać poprawnie wydrukowane,
- grubość ścian wpływa na wytrzymałość elementu,
- podczas projektowania należy stosować zalecenia technologiczne producenta.

Tab.1 Zalecana minimalna grubość ścian
w technologiach AM.

Technologia	Minimalna grubość ściany
FDM	0.8-1.0mm
SLA	0.5-0.8mm
SLM/DMLS	0.3-0.5mm



170

Rys.7 Minimalna grubość ścianki w druku 3D. [Źródło](#)

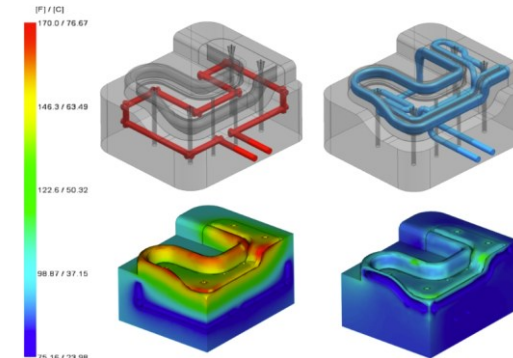
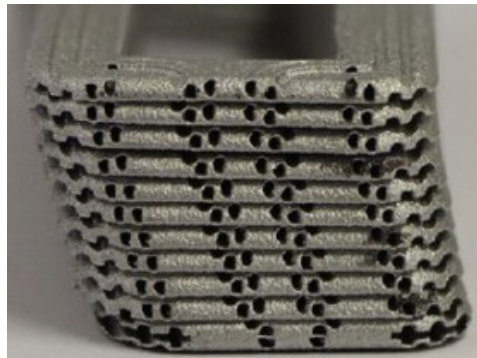
Zaawansowane metody projektowania



171

Technologie addytywne umożliwiają projektowanie i wytwarzanie złożonych struktur wewnętrznych, które są trudne lub niemożliwe do wykonania metodami konwencjonalnymi. Najważniejsze cechy i zastosowania takich rozwiązań obejmują:

- Tworzenie złożonych kanałów wewnętrznych niedostępnych w tradycyjnych procesach wytwarzania,
- Zastosowanie w kanałach chłodzących form wtryskowych,
- Wykorzystanie w układach transportu płynów i gazów,
- Konieczność zapewnienia możliwości usunięcia proszku lub podpór z wnętrza elementu.

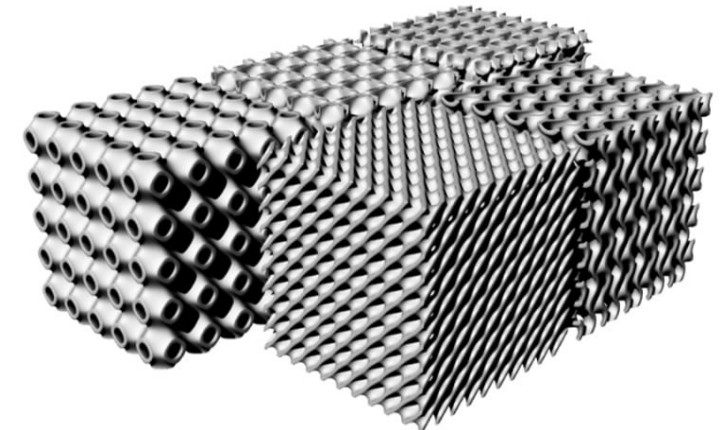


Rys.8 Projektowanie struktur wewnętrznych w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

Struktury kratowe (Lattice Structures)

Technologie addytywne umożliwiają projektowanie i wytwarzanie struktur kratowych (lattice) wewnątrz elementów, co pozwala na optymalizację masy i właściwości mechanicznych konstrukcji. Takie struktury charakteryzują się:

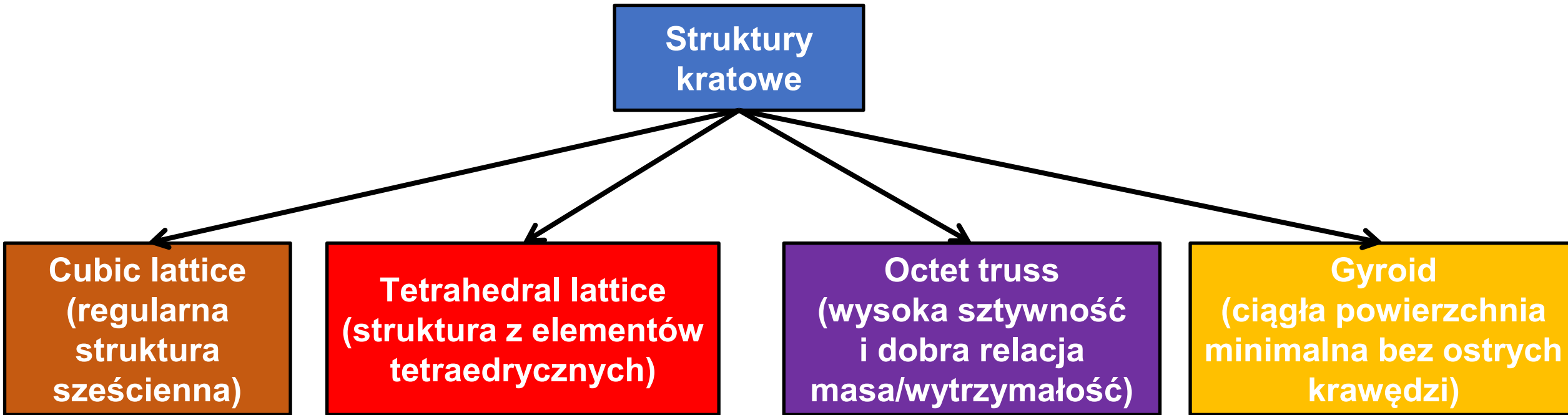
- Periodycznymi strukturami przestrzennymi umieszczanymi wewnątrz komponentu,
- znacznie zmniejszoną masą elementu,
- Zachowaniem wysokiej sztywności konstrukcji,
- zastosowaniem w lotnictwie, motoryzacji oraz implantach medycznych.



173

Rys.9 Struktury kratowe w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

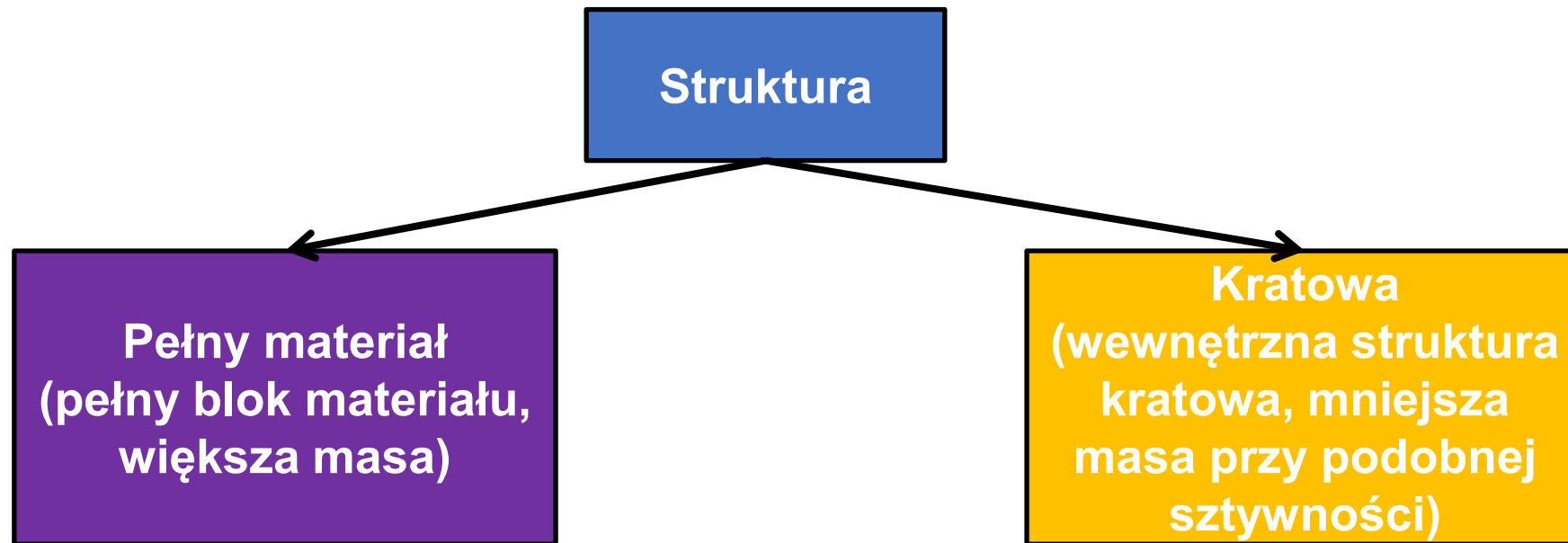
Rodzaje struktur kratowych



Rys.10 Podstawowe typy struktur kratowych stosowanych w technologiach addytywnych.



Zalety struktur kratowych

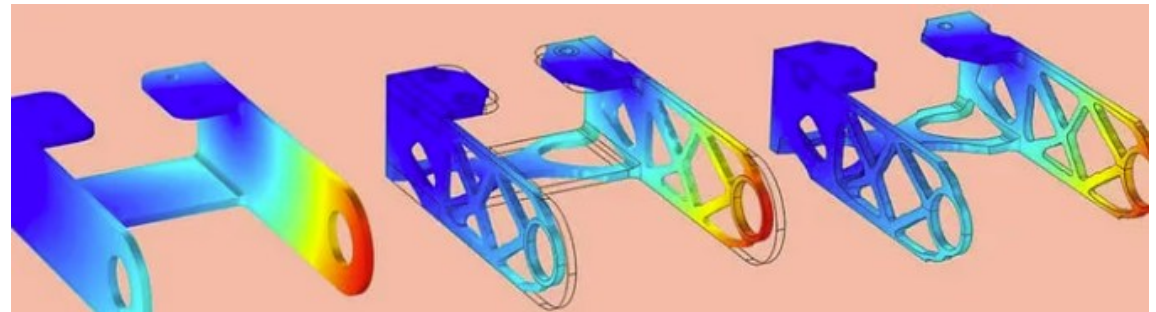
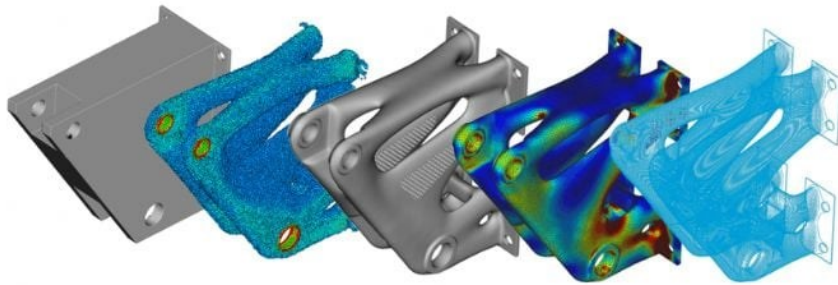


Rys.11 Porównanie struktury pełnej i kratowej
w elementach wytwarzanych addytywnie.



Optymalizacja topologiczna to metoda projektowania wspomaganego komputerowo, która pozwala na uzyskanie konstrukcji o minimalnej masie przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości. Polega ona na:

- Komputerowym wyznaczaniu optymalnego rozkładu materiału w konstrukcji,
- Usuwaniu przez algorytm obszarów o małym obciążeniu,
- Powstawianiu organicznych, lekkich struktur konstrukcyjnych,
- Zastosowaniu m.in. w lotnictwie i motoryzacji.



Rys.12 Etapy optymalizacji topologicznej prowadzącej od modelu wyjściowego do lekkiej struktury nośnej. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

176

Proces optymalizacji topologicznej obejmuje kolejne etapy prowadzące od modelu początkowego do konstrukcji o zoptymalizowanym rozkładzie materiału.

Etapy procesu:

1. Zdefiniowanie geometrii początkowej,
2. Określenie obciążeń oraz warunków brzegowych,
3. Przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych,
4. Wygenerowanie zoptymalizowanej geometrii konstrukcji.



Technologie addytywne umożliwiają integrację wielu elementów konstrukcyjnych w jeden komponent, co pozwala uprościć konstrukcję i proces wytwarzania.

Najważniejsze korzyści:

- Możliwość połączenia wielu elementów w jeden komponent,
- Redukcja liczby połączeń i operacji montażowych,
- Zwiększenie niezawodności konstrukcji dzięki mniejszej liczbie elementów,
- Zmniejszenie masy oraz kosztów produkcji.



Rys.13 Przykłady konsolidacji części w projektowaniu pod technologie addytywne. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

Przykład komponentu lotniczego

Przykład: dysza paliwowa GE (LEAP engine):

- Redukcja liczby części: z 20 do 1,
- Redukcja masy: ok. 25%,
- Większa trwałość komponentu,
- Uproszczenie procesu produkcyjnego.



Rys.14 Złożona geometria wewnętrzna w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

179

Technologie druku 3D

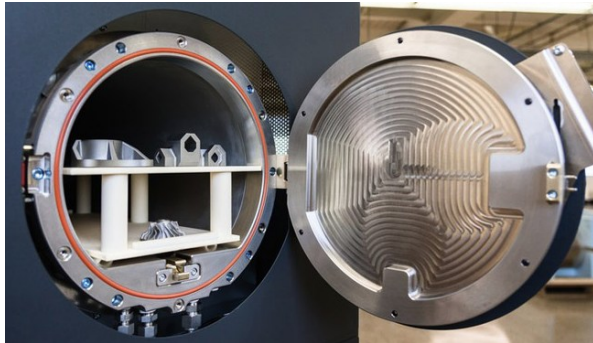


180

Elementy wytwarzane metodami addytywnymi często wymagają dodatkowych operacji wykończeniowych w celu uzyskania odpowiedniej jakości powierzchni, dokładności wymiarowej oraz właściwości materiałowych.

Najczęściej stosowane operacje post-processingu:

- Usuwanie struktur podporowych po zakończeniu procesu druku,
- Obróbka powierzchni (polerowanie, piaskowanie), w celu poprawy jakości powierzchni,
- Obróbka cieplna poprawiająca właściwości mechaniczne materiału,
- Obróbka mechaniczna CNC w celu uzyskania wysokiej dokładności wymiarowej.



Rys.15 Post-processing elementów drukowanych 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)

181

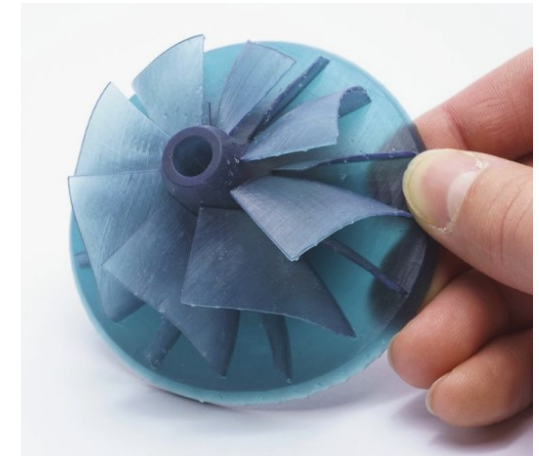
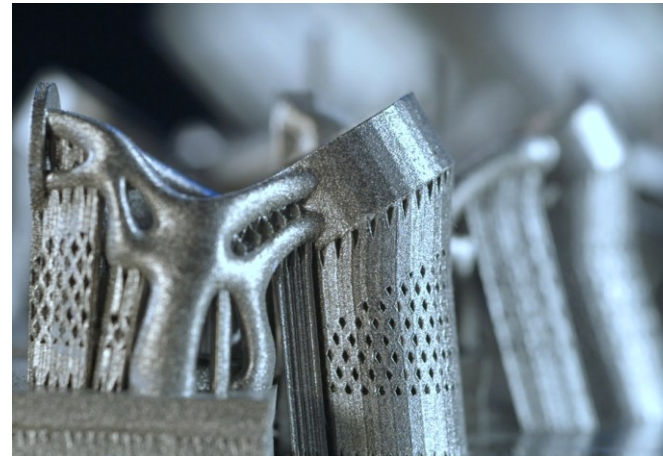
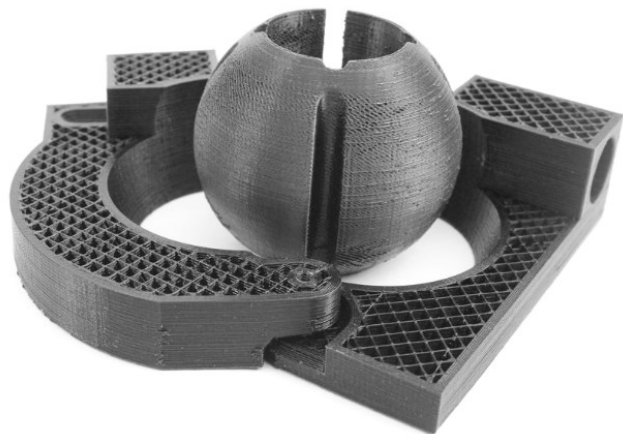


Jakość powierzchni w druku 3D

Jakość powierzchni elementów wytwarzanych metodami addytywnymi zależy głównie od zastosowanej technologii druku oraz parametrów procesu.

Najważniejsze cechy powierzchni w AM:

- widoczne linie warstw wynikające z procesu przyrostowego,
- chropowatość powierzchni zależy od zastosowanej technologii druku,
- najwyższą jakość powierzchni zapewniają technologie SLA / DLP,
- obróbka końcowa pozwala poprawić parametry powierzchni.



182

Rys.16 Przykłady złożonych wydruków 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)



Dokładność wymiarowa elementów w technologii przyrostowej zależy od technologii druku, parametrów procesu oraz właściwości materiału.

Najważniejsze czynniki wpływające na dokładność:

- zależność od rozdzielczości maszyny i grubości warstwy,
- wpływ skurczu termicznego materiału,
- konieczność kalibracji oraz kompensacji błędów procesu.

Tab.2 Porównanie dokładności technologii FDM, SLA i SLM.

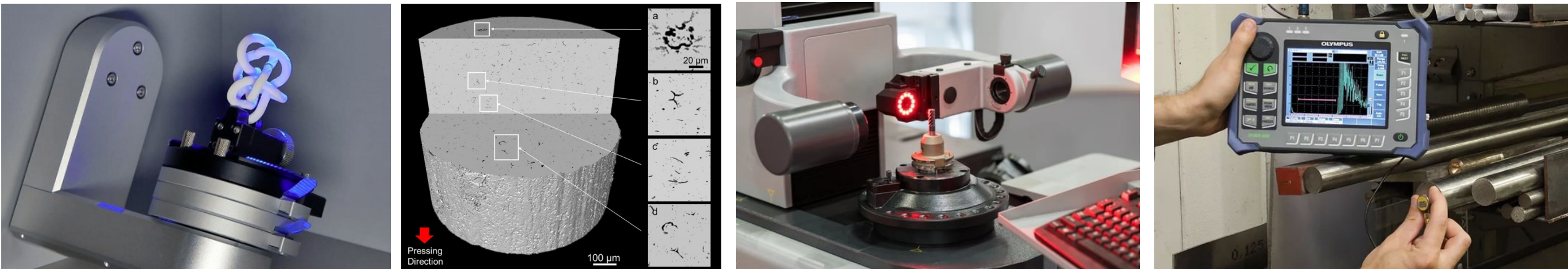
Technologia	Typowa dokładność
FDM	$\pm 0.2 - 0.5$ mm
SLA	$\pm 0.05 - 0.2$ mm
SLM	$\pm 0.1 - 0.3$ mm

183



Najczęściej stosowane metody kontroli:

- Skanowanie 3D w celu porównania elementu z modelem CAD,
- Tomografia komputerowa umożliwiająca analizę struktury wewnętrznej,
- Inspekcja optyczna pozwalająca ocenić jakość powierzchni,
- Badania nieniszczące (NDT) wykrywające defekty materiałowe.

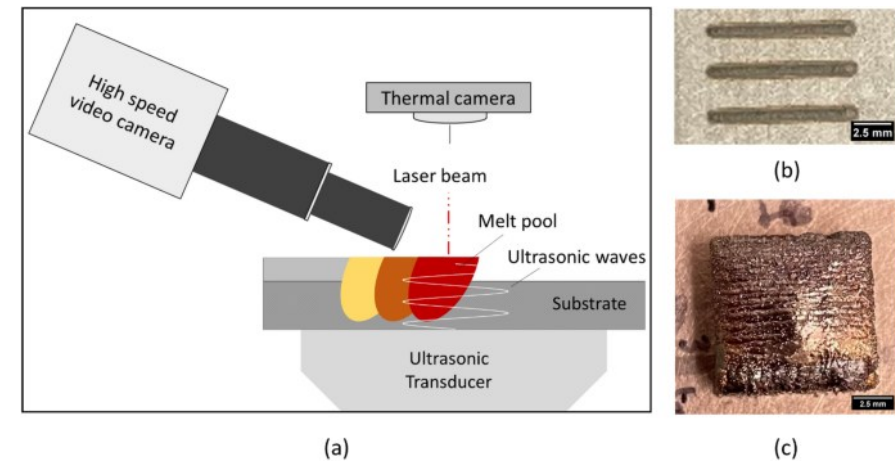
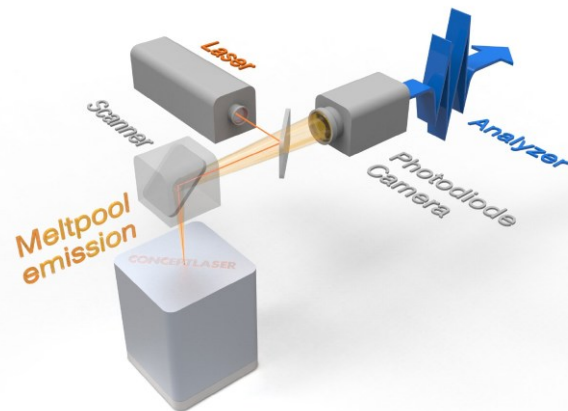


Rys.17 Metody kontroli jakości w druku 3D. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#)

Monitoring procesu druku 3D umożliwia bieżącą kontrolę parametrów procesu oraz wczesne wykrywanie defektów powstających podczas budowy elementu.

Najważniejsze elementy monitoringu procesu:

- Zastosowanie czujników monitorujących przebieg procesu budowy,
- Analiza temperatury oraz stabilności procesu topienia materiału,
- Wykrywanie defektów w trakcie druku, takich jak pory czy brak przetopienia,
- Poprawa jakości i niezawodności procesu produkcyjnego.



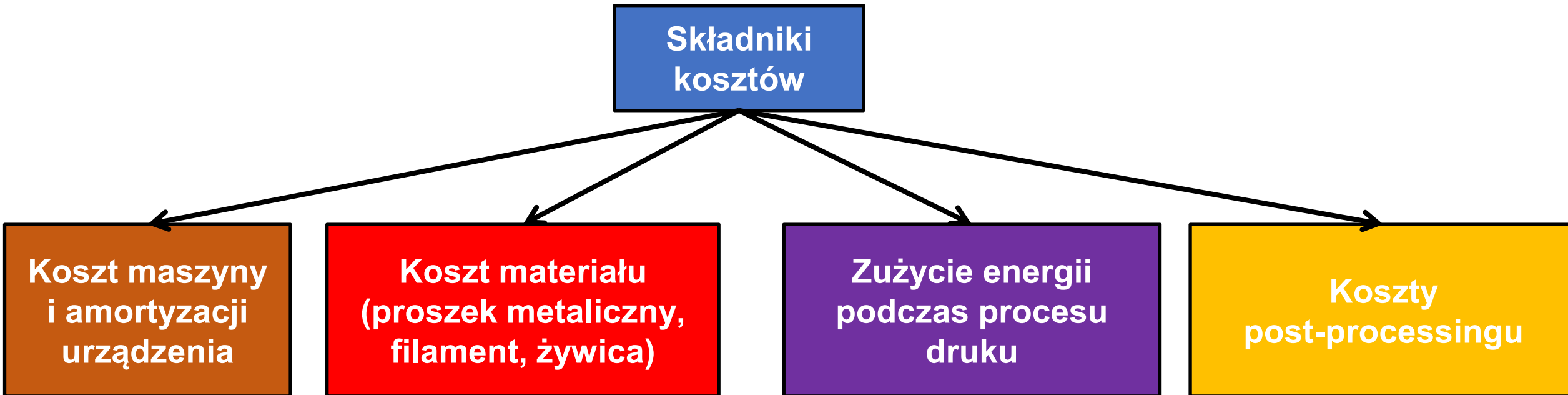
Rys.18 Schemat monitorowania jeziora ciekłego metalu. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

Właściwości mechaniczne elementów wytwarzanych w technologii przyrostowej zależą od parametrów procesu oraz orientacji druku.

Najważniejsze elementy monitoringu procesu:

- Materiały wykazują anizotropię właściwości mechanicznych,
- Orientacja druku wpływa na wytrzymałość elementu,
- Struktura warstwowa może inicjować pękanie międzywarstwowe,
- Obróbka cieplna pozwala poprawić właściwości materiału.





Rys.19 Schemat podstawowych składników kosztów procesu wytwarzania przyrostowego, obejmujących urządzenie, materiał, energię oraz post-processing.



Kiedy AM jest opłacalne?

Najważniejsze sytuacje zastosowania

**Produkcja w
małych seriach**

**Bardzo złożona
geometria elementów**

**Personalizacja
produktu**

**Szybkie
prototypowanie**

Rys.20 Kluczowe obszary zastosowań technologii addytywnych obejmujące małoseryjną produkcję, złożoną geometrię, personalizację oraz szybkie prototypowanie.

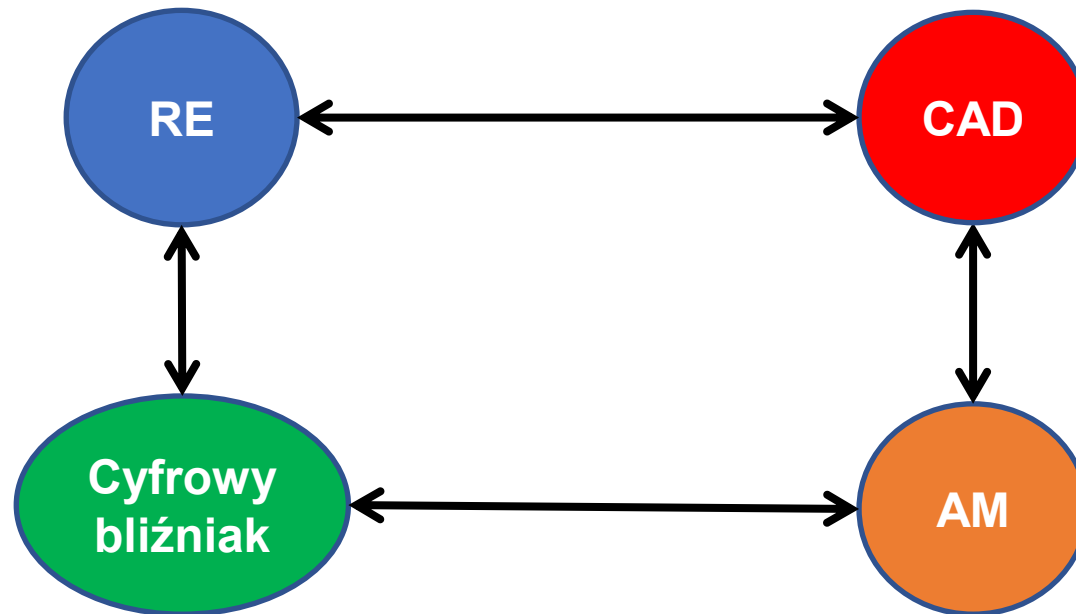
Nowoczesne systemy inżynierskie opierają się na integracji danych pomiarowych z modelami cyfrowymi i algorytmami sztucznej inteligencji. Połączenie AI, IoT (internetu rzeczy) i Big Data umożliwia automatyzację analizy oraz podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym.



Rys.21 Architektura systemu predykcyjnego w inżynierii: integracja danych pomiarowych i algorytmów AI



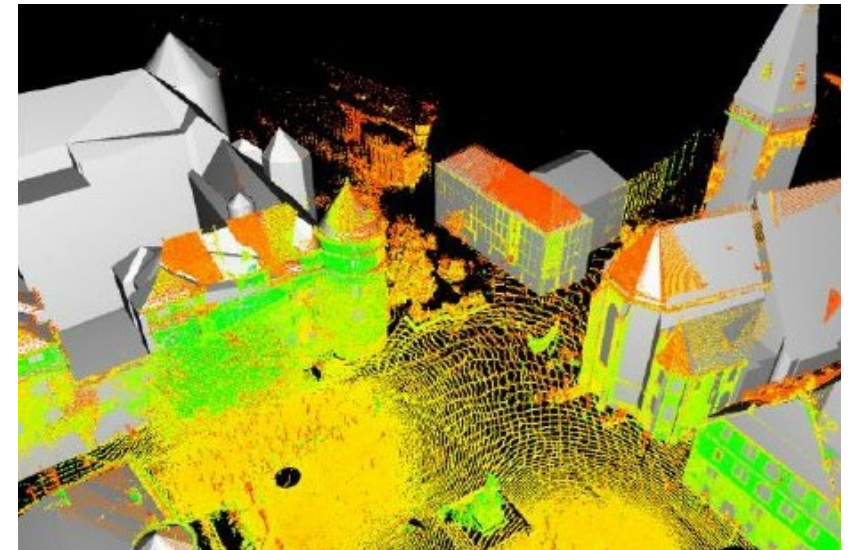
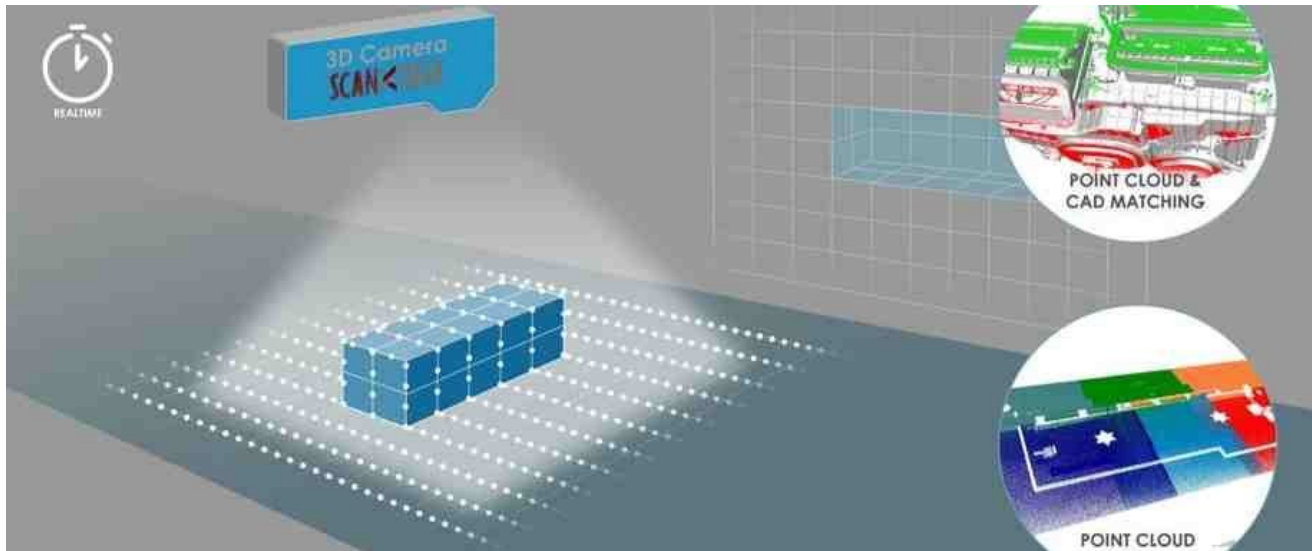
Inżynieria odwrotna i techniki przyrostowe ewoluowały od narzędzi rekonstrukcji i wytwarzania do elementów zintegrowanych systemów cyfrowych. Obecnie stanowią podstawę tworzenia modeli cyfrowych i ich fizycznej realizacji.



Rys.22 Schemat iteracyjnego cyklu rozwoju produktu: inżynieria odwrotna, modelowanie CAD, wytwarzanie addytywne i cyfrowy bliźniak

190

Skanowanie 3D generuje chmury punktów stanowiące podstawę dalszej analizy. Dane te są wykorzystywane przez AI do rekonstrukcji geometrii i oceny jakości modeli.



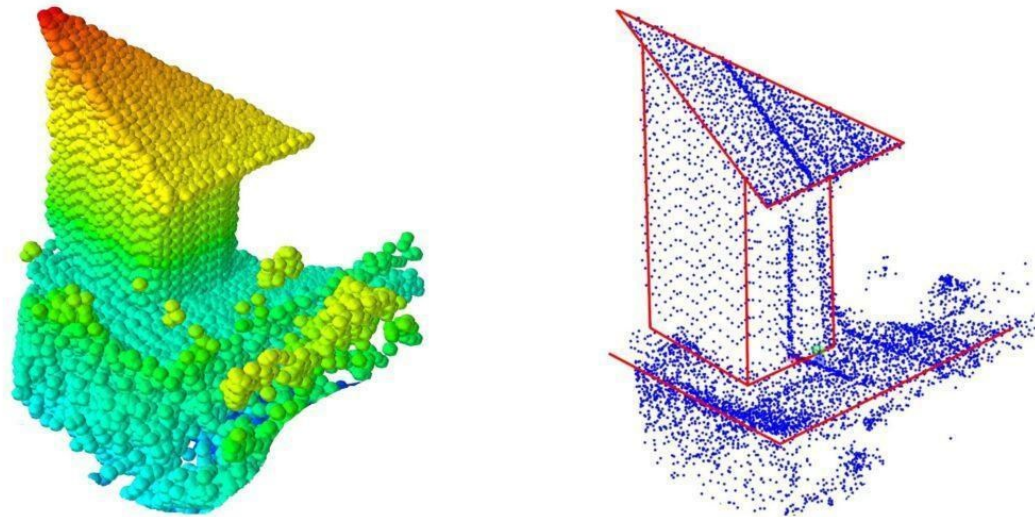
Rys.23 Proces skanowania 3D oraz rekonstrukcji geometrii na podstawie chmury punktów.

Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

191



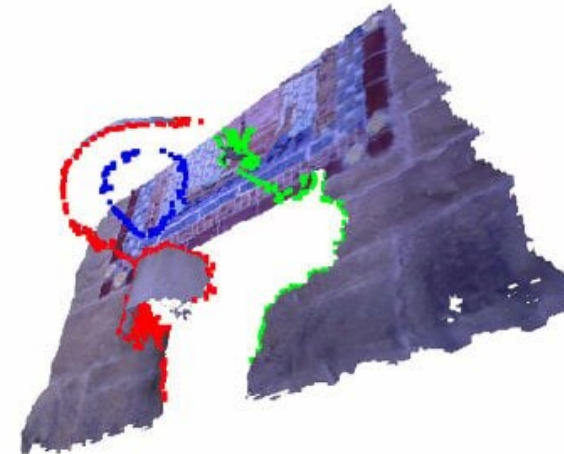
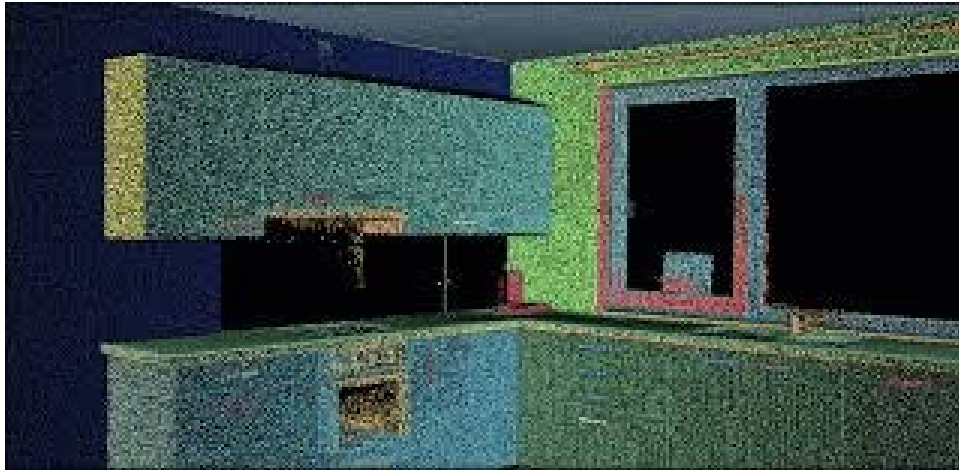
Procesy RE i AM generują heterogeniczne zbiory danych o dużej objętości, zmienności i złożoności (Big Data), obejmujące dane geometryczne, materiałowe i procesowe. Integracja tych danych z algorytmami AI umożliwia automatyczne wykrywanie wzorców, predykcję jakości oraz adaptacyjne sterowanie procesem w czasie rzeczywistym. W efekcie możliwe jest zwiększenie dokładności modeli, poprawa jakości wytwarzanych elementów oraz skrócenie czasu iteracji projektowych.



Rys.24 Chmura punktów obiektu oraz dopasowanie modelu geometrycznego (CAD) w procesie inżynierii odwrotnej. Źródło: [\[1\]](#)

192

AI wspiera segmentację chmur punktów oraz rekonstrukcję powierzchni geometrycznych. W praktyce przekłada się to na wyższą dokładność modeli, lepsze odwzorowanie detali oraz skrócenie czasu potrzebnego na analizę i przygotowanie danych.



Rys.25 Chmura punktów obiektu przed i po przetwarzaniu, redukcja szumu oraz segmentacja struktur geometrycznych. Źródło: [\[1\]](#), [\[2\]](#)

193

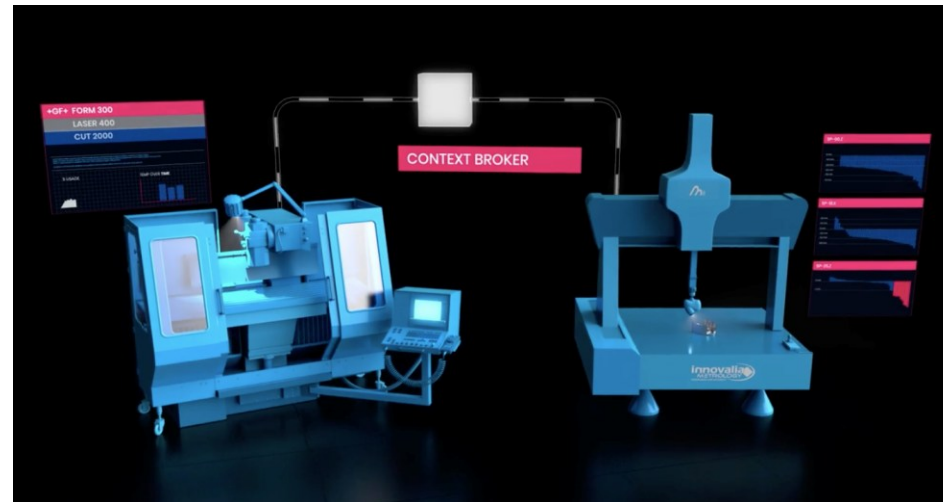
Systemy IoT umożliwiają monitorowanie parametrów procesu skanowania i druku 3D w czasie rzeczywistym, takich jak temperatura, prędkość, dokładność pozycjonowania czy jakość warstw. Dane te są na bieżąco analizowane i wykorzystywane do kontroli jakości oraz optymalizacji procesu, co pozwala szybciej wykrywać odchylenia i poprawiać stabilność wytwarzania.



Rys.26 Zdalne monitorowanie i sterowanie drukarką 3D z wykorzystaniem technologii IoT i aplikacji mobilnej. Źródło: [\[1\]](#)

194

Cyfrowy bliźniak (Digital Twin) integruje model cyfrowy z danymi rzeczywistymi z systemu technicznego. W RE wykorzystuje dane skanowania 3D do aktualizacji geometrii, a w AM dane procesowe (np. temperatura, prędkość druku, jakość warstw). Umożliwia analizy i symulacje oraz bieżącą aktualizację modelu, wspierając optymalizację procesu, poprawę jakości i predykcję odchyleń.



Rys.27 Integracja maszyn produkcyjnych z systemem cyfrowego bliźniaka poprzez broker kontekstu (IoT), wymiana danych i monitorowanie procesu. Źródło: [\[1\]](#)

195

Najważniejsze wnioski:

- Technologie przyrostowe umożliwiają wytwarzanie elementów o bardzo złożonej geometrii,
- Proces budowy elementu odbywa się warstwa po warstwie, co pozwala ograniczyć zużycie materiału,
- Technologie przyrostowe znajdują zastosowanie m.in. w lotnictwie, medycynie, motoryzacji oraz szybkim prototypowaniu,
- Jakość elementów zależy od parametrów procesu, orientacji druku oraz post-processingu,
- Druk 3D jest szczególnie opłacalny w przypadku małoseryjnej produkcji i personalizacji produktów,
- Integracja AI, IoT oraz technik addytywnych prowadzi do automatyzacji procesów projektowania i wytwarzania. Powstają systemy zdolne do adaptacji i samodzielnej optymalizacji.



Dziękuję za uwagę