AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

KATEDRA AUTOMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Raport na temat:

Zaprojektowanie i eksperymentalna weryfikacja przestrzennego rozmieszczenia elementów stanowiska zrobotyzowanego pod kątem systemu wizyjnego

Wykonał zespół badawczy: **dr hab. inż. Paweł Rotter**
dr inż. Marcin Nowak
Piotr Lizończyk

Kraków, 2015

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Praca wykonana w ramach projektu CYTOROBOT finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2012-2015.
Umowa nr PBS1/A9/1/2012 w ramach Programu Badań Stosowanych w ścieżce A

PBS Program Badań Stosowanych

Spis treści

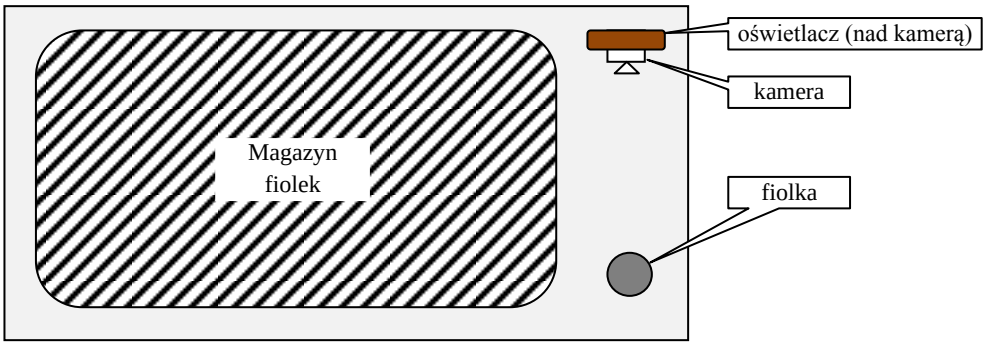
1. Założenia projektowe szuflady do pobierania leków cytostatycznych 4
2. Główne problemy i zakres eksperymentów 4
2.1. Dobór kamery 4
1.1.1 Trust WB-5400 5
1.1.2 Logitech WebCam C920 5
1.1.3 Logitech WebCam Pro 9000 7
1.1.4 Logitech HD Webcam C525 9
1.1.5 Rekomendacja kamery do celów projektu 11
2.2. Problemy paralaksy 11
2.3. Problemy głębi ostrości 12
3. Testy odległości kamery od fiolki 13
4. Proponowane oświetlenie szuflady 14
4.1. Schemat doświadczalnego oświetlenia 14
4.2. Alternatywne metody oświetlenia szuflady 15
4.3. Testy różnych położeń oświetlacza 15
5. Zniekształcenia obrazu wynikające z małych odległości 17
6. Położenie fiolki względem własnej osi 18
7. Kąt obserwacji 18
8. Oświetlenie, a pomiar położenia igły 18
9. Testy algorytmu wykrywania poziomu cieczy 20
10. Podsumowanie wniosków dotyczących wykonania szuflady z punktu widzenia systemu wizyjnego 21

1. Założenia projektowe szuflady do pobierania leków cytostatycznych

Zgodnie z założeniami projektu, pobieranie koncentratu leku cytostatycznego będzie odbywać się w zamkniętych pojemnikach, tzw. szufladach, będących w zasięgu robota pracującego w układzie kartezjańskim. Fragment systemu inspekcji optycznej (określany w dalszej części raportu podsystemem optycznej inspekcji szuflady, POIS) składający się z kamery i oświetlacza będzie umieszczony w każdej szufladzie, zatem w docelowym rozwiązaniu istotny jest dobór elementów o niewielkiej cenie, gdyż przy znacznej liczbie szuflad koszt kamer i oświetlaczy umieszczonych w szufladach łączna cena podsystemów POIS może stanowić istotny składnik kosztu całego cytorobota. Ważne jest także uzyskanie niewielkich rozmiarów pojedynczego podsystemu, który będzie rozmieszczony wzdłuż krótszego boku szuflady (Rys. 1). Zatem odległość kamery od fiolki z koncentratem leku będzie rzędu 10 cm.

Zadaniami podsystemu POIS będzie:

- bieżące kontrolowanie poziomu cieczy w fiolce
- kontrolowanie stopnia przebicia korka zamykającego fiolkę przez igłę



Rys. 1 Schemat szuflady (widok z góry). Długość krótszego boku szuflady jest przewidziana na ok. 15 cm, stąd odległość kamery od fiolki będzie rzędu 10 cm

2. Główne problemy i zakres eksperymentów

2.1. Dobór kamery

Rozważając dobór kamery, brano pod uwagę następujące parametry:

- Cena kamery: w rozwiązaniu docelowym kamera do obserwacji poziomu cieczy w fiolce będzie umieszczona w każdej szufladzie, zatem w jednym urządzeniu będzie potrzeba kilkadziesiąt kamer. Stąd cena jednostkowa kamery będzie mieć zauważalny udział w cenie cytorobota. Z drugiej strony zadanie do którego będzie wykorzystany system wizyjny instalowany w poszczególnych szufladach nie wymaga kamery o bardzo wysokiej jakości. Założyliśmy, że będziemy testować kamery o cenie nie przekraczającej 300 zł.
- Możliwość wykonywania ostrych zdjęć z bliskiej odległości, ze względu na ograniczoną przestrzeń w szufladzie kamera będzie znajdowała się w odległości nie większej niż 10 cm od obserwowanego obiektu.

- Możliwość ręcznego ustawienia ostrości. Ze względu na małą odległość kamery od obiektu, wskazana jest możliwość zmiany ostrości w trakcie działania algorytmu w zależności od aktualnego obszaru zainteresowania
- Jakość pozyskiwanych obrazów.

Przetestowano cztery typy kamer:

- Trust WB-5400
- Logitech HD Pro Webcam C920
- Logitech WebCam Pro 9000
- Logitech HD Webcam C525

1.1.1 Trust WB-5400

Kamera Trust WB-5400 jest przedstawiona na Rys. 2. Jest to najprostsza z kamer branych pod uwagę, o rozdzielczości video 1280 x 1024 pikseli i rozdzielczości zdjęć 4 MPix, jednak po wstępnych testach okazało się, że jakość obrazu jest zbyt niska (głównie z powodu wysokiego poziomu szumów) i mogłaby wpływać na błędy algorytmu rozpoznawania. Z tego względu zrezygnowaliśmy z dalszych eksperymentów z tą kamerą.

Rys. 2. Kamera Trust WB-5400

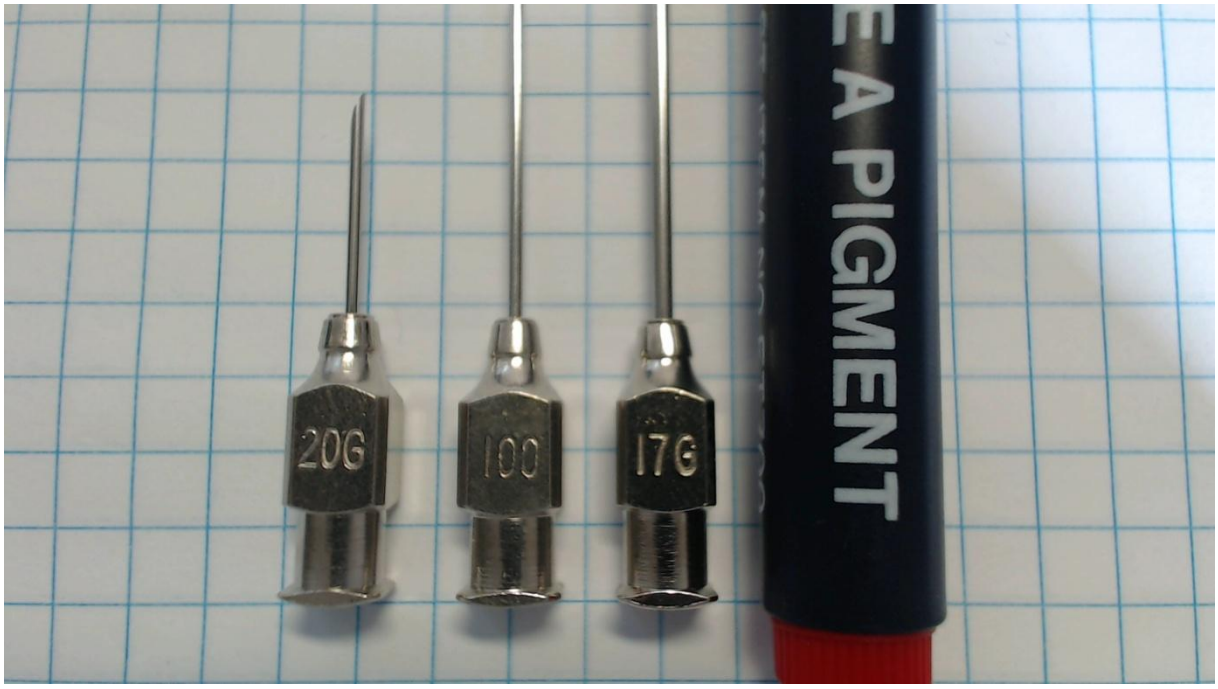
1.1.2 Logitech WebCam C920

Kamerę Logitech WebCam C920 przedstawiono na Rys. 3.
Podstawowe parametry kamery:

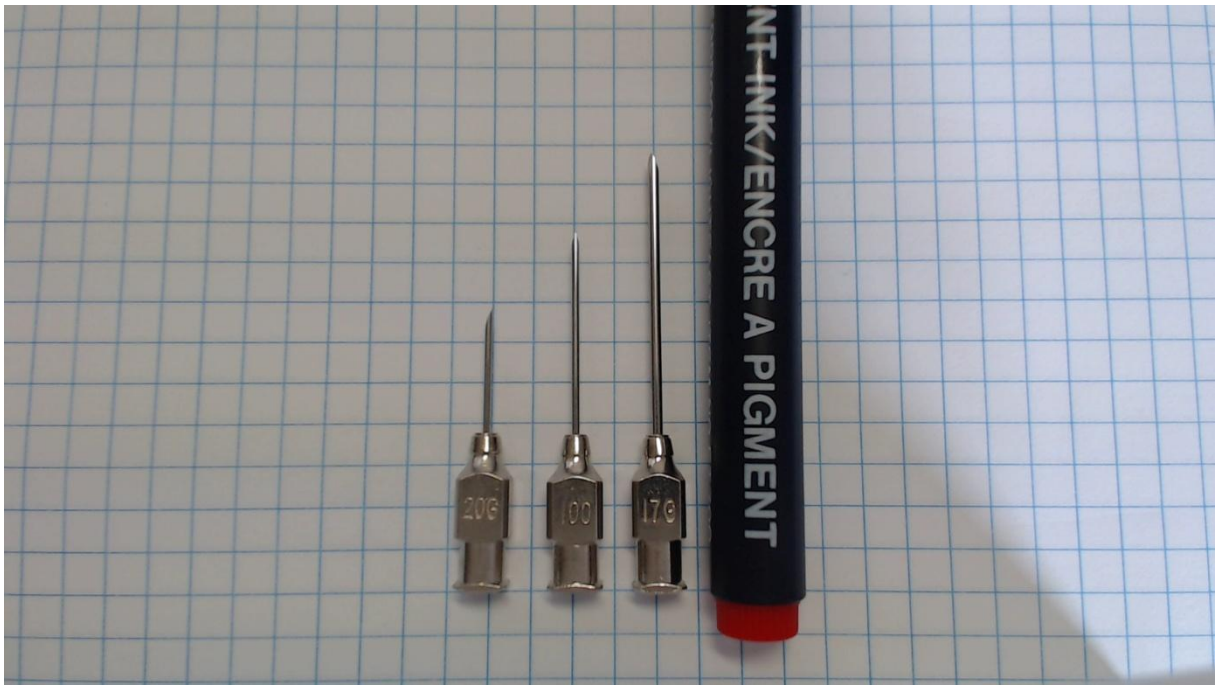
- rozdzielczość 1920 x 1080 pikseli
- rozdzielczość zdjęć: 15 MPix
- kompresja w standardzie H.264
- obiektyw Carl Zeiss z 20-stopniowym autofocusem
- możliwość programowego ustawienia ostrości, także w trakcie pracy kamery

Rys. 3. Kamera Logitech WebCam C920

Jakość obrazów dostarczanych przez kamerę jest wystarczająca do zastosowania w projekcie. Obrazy mają niski poziom szumów, jak również cechują się stosunkowo niewielką jak na szerokokątny obiektyw dystorsją radialną. Przykładowe obrazy wykonane z odległości 5.5 oraz 10 cm przedstawiono na Rys. 4 i Rys. 5.



Rys. 4. Obraz z kamery Logitech WebCam C920 z odległości 5,5 cm



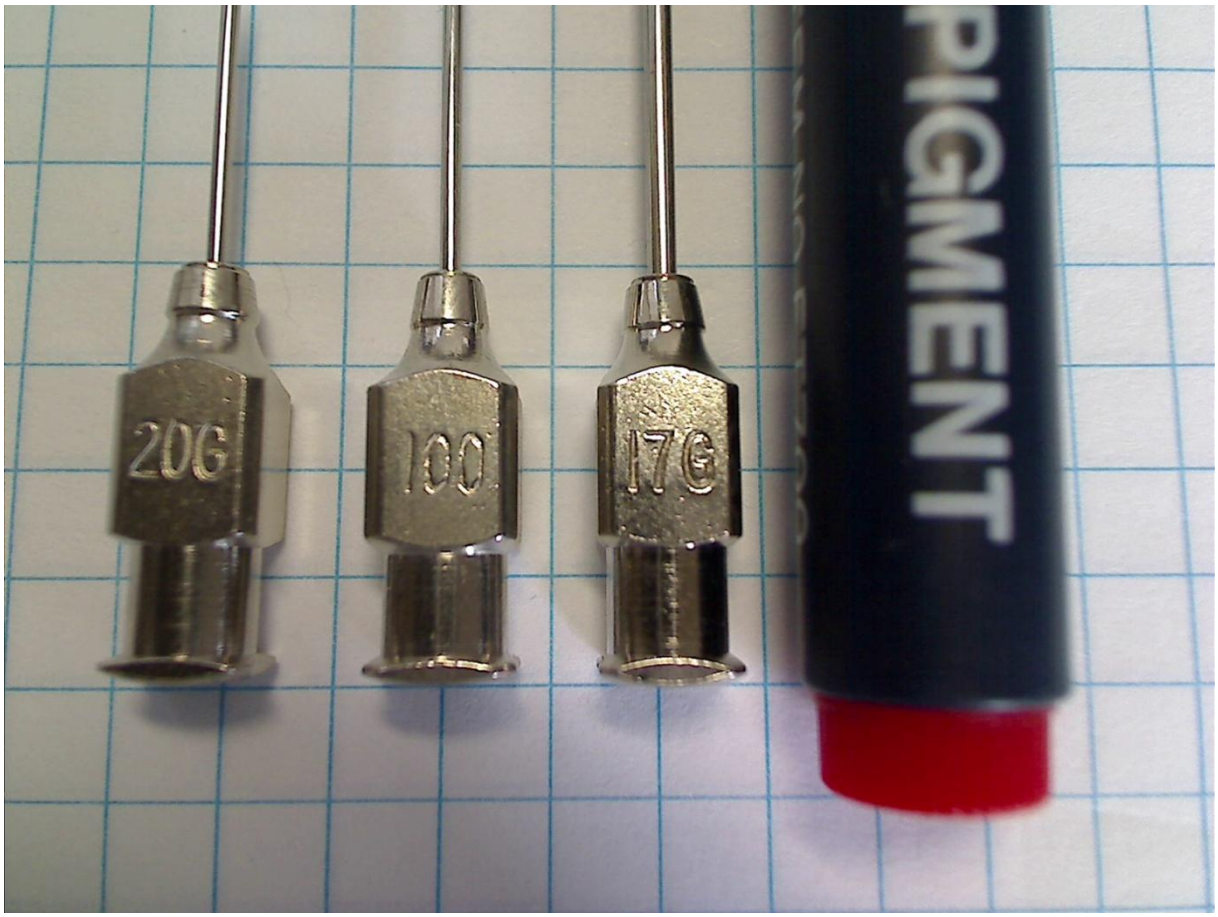
Rys. 5. Obraz z kamery Logitech WebCam C920 z odległości 10 cm

1.1.3 Logitech WebCam Pro 9000

Logitech WebCam Pro 9000 jest rozwiązaniem pośrednim między kamerą Trust WB-5400 i Logitech WebCam C920. Maksymalna rozdzielczość trybu video wynosi 1600 x 1200 pikseli, choć dla zdjęć rozdzielczość także wynosi 1.92 MPix, a więc dwukrotnie mniej niż w przypadku kamery Trust WB-5400. Jednakże poziom szumów dla WebCam Pro 9000 jest znacznie niższy niż dla Trust WB-5400. Kamerę przedstawiono na Rys. 6.

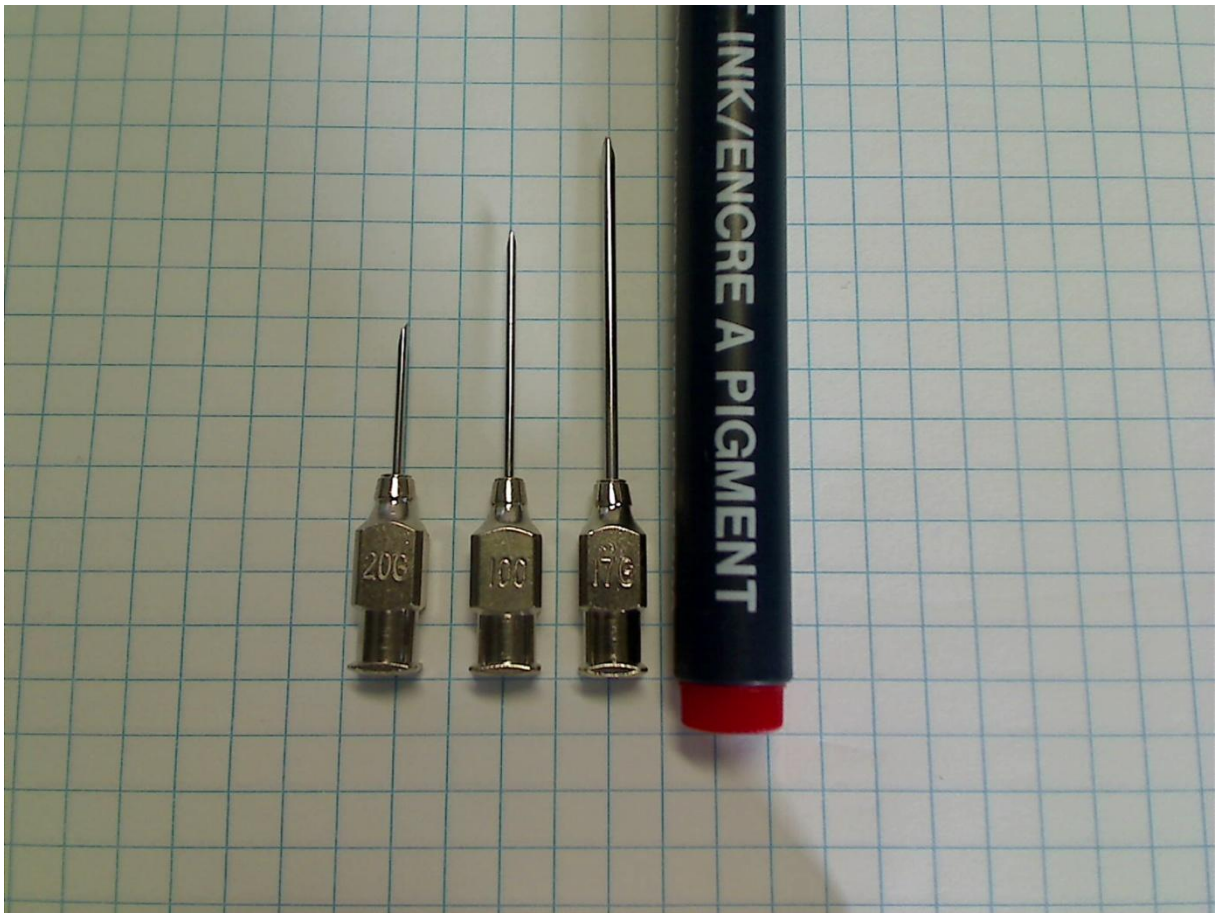
Rys. 6. Kamera Logitech WebCam Pro 9000

W stosunku do WebCam C920, sensor kamery WebCam Pro 9000 ma zdecydowanie mniejszą rozdzielczość (1.92 MPix w porównaniu z 15 MPix). Istotne jest też, że kamera WebCam C920 pozwala na uzyskanie ostrego obrazu z nieco mniejszej odległości. Według danych producenta, minimalna odległość obiektu od kamery dla WebCam Pro 9000 to 3.9 cala, czyli niemal 10 cm. Wprawdzie udało się nam uzyskać względnie ostry obraz już dla odległości 5.5 cm (Rys. 7), ale ostrość obiektów bliższych niż 5 cm (jak napis na pisaku na Rys. 7) gwałtownie spada.



Rys. 7. Logitech WebCam Pro 9000 5.5 cm

Dla odległości od obiektu wynoszącej 10 cm kamera daje względnie dobry obraz, który mógłby być podstawą dalszego przetwarzania. Jednak ze względu na niewielką różnicę w cenie, lepszą jakość obrazu oraz większą uniwersalność, kamera WebCam C920 jest zdecydowanie bardziej odpowiednia do celów projektu niż WebCam Pro 9000.



Rys. 8. Obraz z kamery Logitech WebCam Pro 9000 z odległości 10 cm

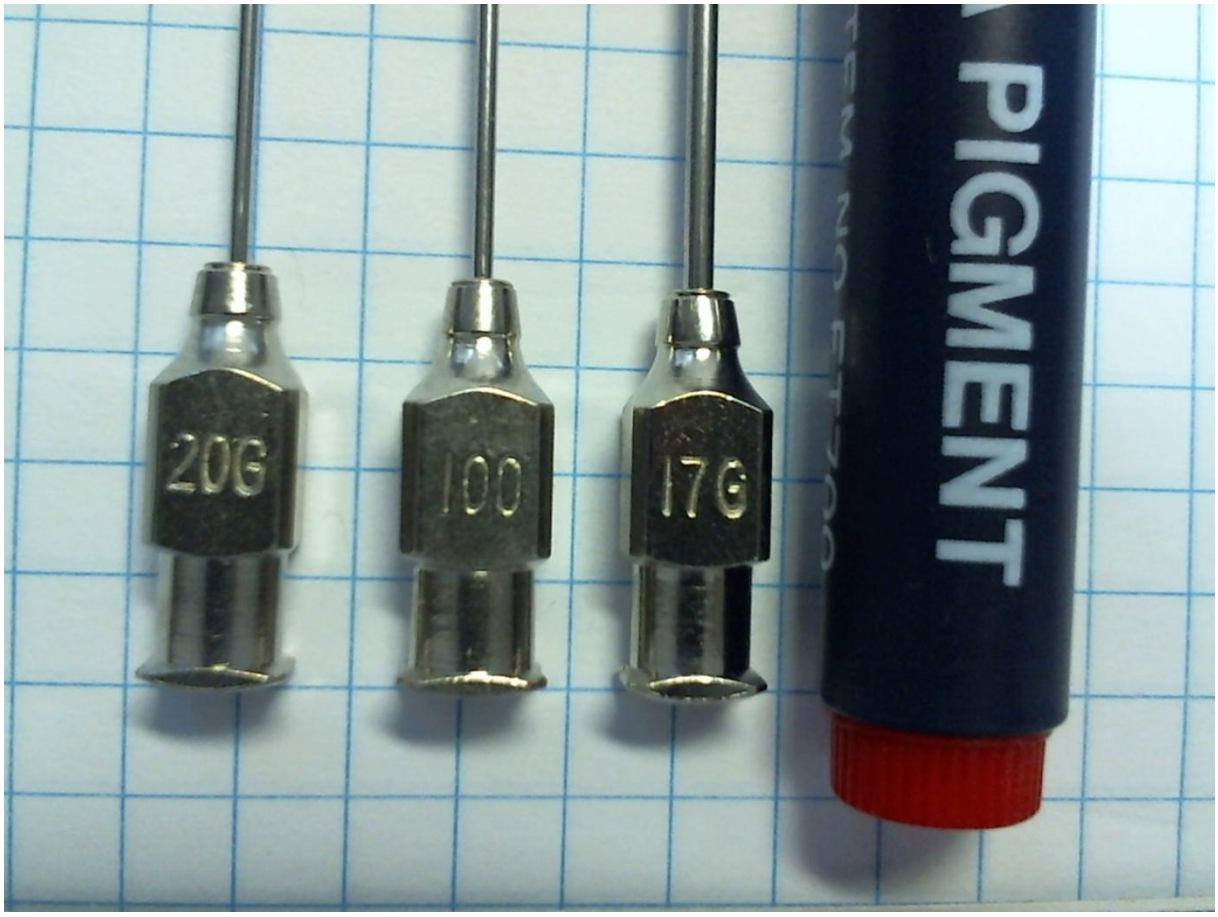
1.1.4 Logitech HD Webcam C525

Kamerę Logitech HD Webcam C525 przedstawiono na Rys. 9.
Podstawowe parametry kamery:

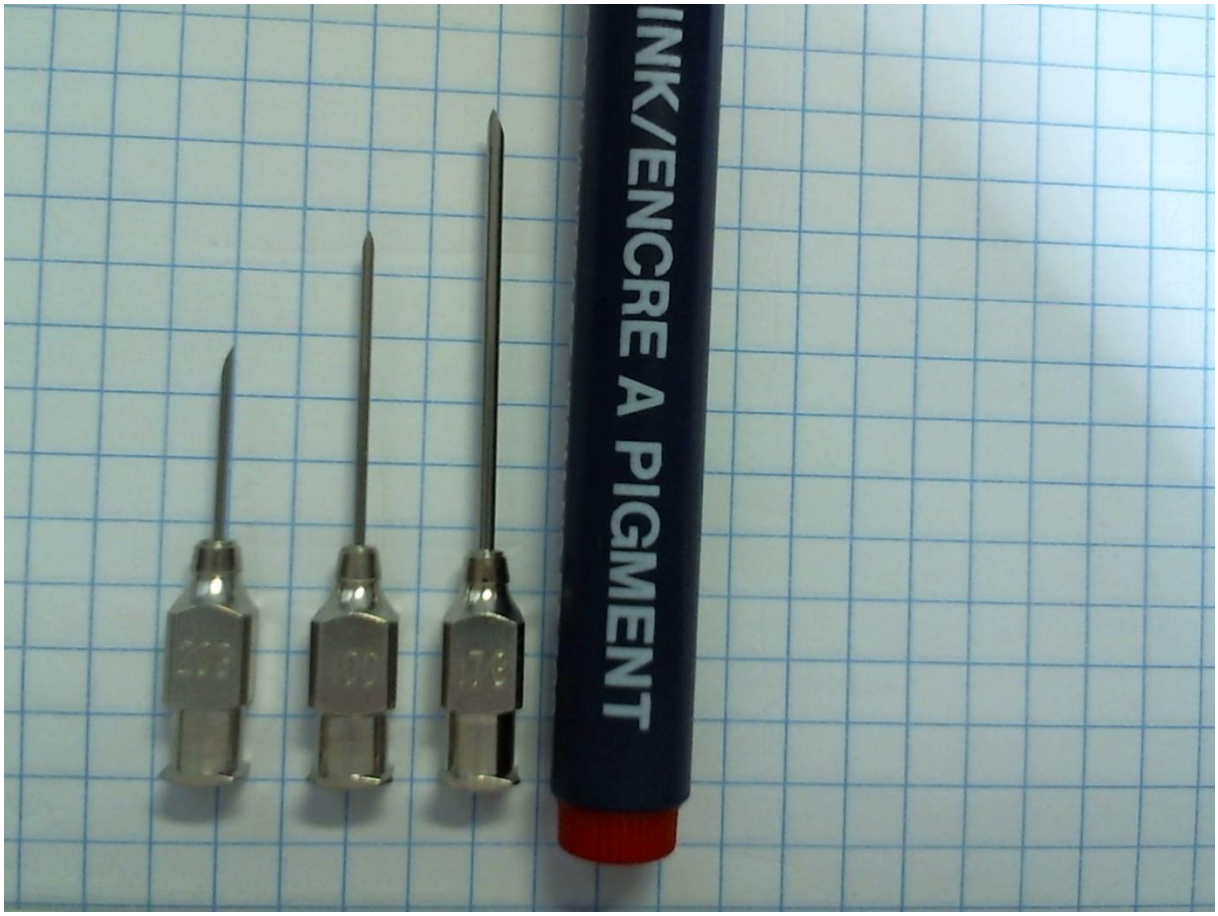
- rozdzielczość video: 1280 x 720
- rozdzielczość zdjęć: 8 Mpix
- Autofocus i manual focus

W porównaniu z kamerą Logitech WebCam C920, kamera Logitech HD Webcam C525 ma dwukrotnie mniejszą rozdzielczość. W przypadku ograniczonej przestrzeni istotnym mankamentem jest węższy kąt obiektywu, jak również mniej ostry obraz przy odległości ok. 5 cm.

Rys. 9. Kamera Logitech HD Webcam C525



Rys. 10. Obraz z kamery Logitech HD Webcam C525 z odległości 5.5 cm



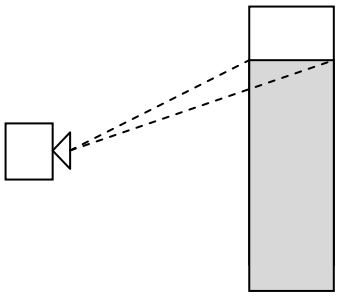
Rys. 11. Obraz z kamery Logitech HD Webcam C525 z odległości 10.5 cm

1.1.5 Rekomendacja kamery do celów projektu

Na podstawie wykonanych testów zdecydowano się na wybór kamery
Logitech WebCam C920

2.2.Problemy paralaksy

Kamera nie zawsze będzie się znajdować w płaszczyźnie powierzchni cieczy, i co więcej kąt obserwacji powierzchni cieczy będzie się zmieniał w zależności od poziomu cieczy. W takiej sytuacji obserwowana przez kamerę linia poziomu cieczy nie będzie ostra, bez względu na ustawienie ostrości kamery (por. Rys. 12).



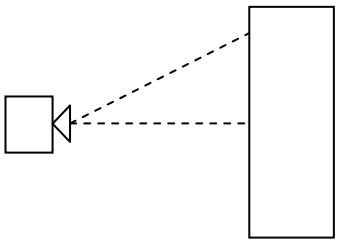
Rys. 12. Nieostra linia poziomu cieczy na skutek występowania paralaksy

2.3.Problemy głębi ostrości

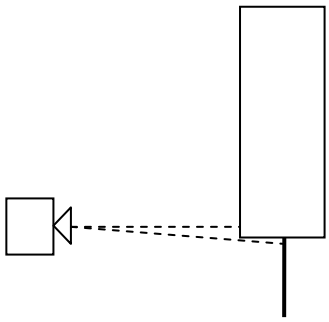
Odległość kamery od różnych fragmentów fiolki nie jest jednakowa. Różnice będą wynosiły wprawdzie nie więcej niż parę centymetrów, jednak ze względu na niewielką odległość kamery od fiolki mogą być na tyle istotne, że nie będzie możliwe równoczesne wyświetlenie całego obrazu bez utraty ostrości jego fragmentów. Ograniczenia wynikające z potrzeby wykonania oświetlacza o niewielkich rozmiarach, niewielkim koszcie oraz nie podnoszącego w istotnym stopniu temperatury wewnątrz szuflady powodują ograniczenia jasności podświetlenia. Wynika stąd, że zapewne będziemy używać najmniejszej przesłony dostępnej dla danego typu kamery, co dodatkowo ograniczy głębię ostrości.

Różnice w odległości kamery od obiektu wynikają :

a) z różnic odległości kamery od różnych miejsc fiolki (Rys. 13)
b) z różnicy między odległością kamery od fiolki i odległością kamery od igły (Rys. 14)



Rys. 13 Z uwagi na niewielką odległość kamery od fiolki, różnice odległości kamery od różnych fragmentów fiolki mogą być istotne dla ostrości obrazu



Rys. 14 Odległość kamery od fiolki z koncentratem różni się od odległości kamery od igły

Stąd też przewidzieliśmy wykonanie eksperymentów ze zmianą ostrości w trakcie pomiarów, tak aby ostrość była automatycznie ustawiana na ten fragment obrazu, którego w danym momencie dotyczą pomiary.

3. Testy odległości kamery od fiolki

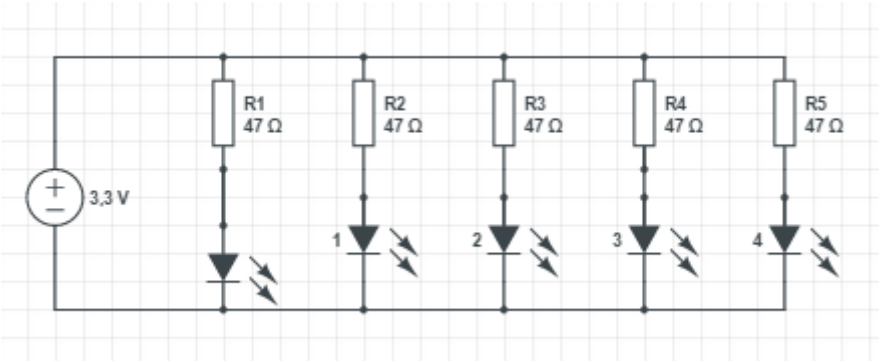
Ustalono, że kamera Logitech HD Pro Webcam C920 zdolna jest przechwycić ostry obraz obiektu znajdującego się w odległości ok. 5 cm od niej. W związku z faktem, że wysokość fiolek może być zmienna, a tak bliskie umiejscowienie obiektu diametralnie zmniejsza ilość miejsca na obrazie, które powinno być przeznaczone na śledzenie toru igły, na podstawie przeprowadzonych testów ustalono, że minimalna **odległość obiektywu kamery od części fiolki leżącej najbliżej kamery powinna wynosić 10 cm**. Takie ustawienie pozwala również na zredukowanie wpływu perspektywy na obraz fiolki i cieczy w niej zawartej w porównaniu do wykorzystywania minimalnej odległości dającej ostry obraz (5 cm).

Rys. 15 Przykładowa klatka z przechwytywanego obrazu dla przyjętej odległości kamery od fiolki

Przykładową przechwyconą klatkę przedstawiono na Rys. 15. Widoczny na niej pojemnik ma 7,2 cm wysokości i zajmuje ok. 60% pola widzenia kamery względem dłuższego wymiaru. Można zauważyć, że takie umiejscowienie pozostawia duży margines dla rozmiaru fiolki (pojemnik ma maksymalną średnicę 5,8 cm), obiekt nie znajduje się na blisko brzegów obrazu, a niewypełniona górna część klatki pozwoli śledzić ruch igły.

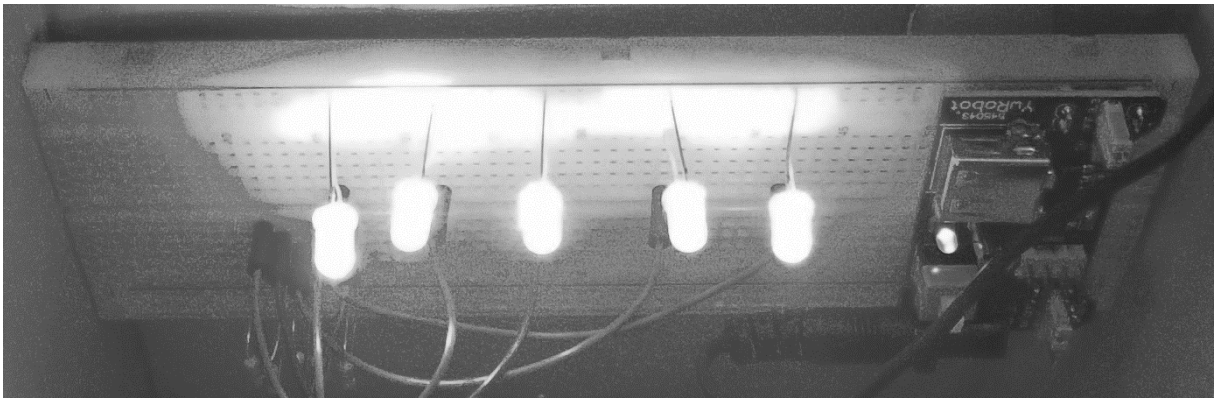
4. Proponowane oświetlenie szuflady

4.1. Schemat doświadczalnego oświetlenia



Rys. 16 Schemat wykorzystanego oświetlacza

Na Rys. 16 przedstawiono schemat wykorzystanego w doświadczeniach oświetlacza. Składał się on z 5 diod LED o kolorze czerwonym, świecących z jasnością ok. 2 kandeli (wartość orientacyjna podana przez sprzedawcę), działających na napięciu 2 V. W związku z zasilaniem napięciem o wyższej wartości, dokonano redukcji napięcia za pomocą rezystorów 47 Ohm. Całość oświetlacza zmontowano na płytce stykowej, jak pokazano na Rys. 17.



Rys. 17 Układ diod zbudowany na płytce stykowej

4.2. Alternatywne metody oświetlenia szuflady

W docelowej konfiguracji można również zastosować taśmy ledowe, ze względu na większą wygodę ich użycia oraz prostotę montażu. W szufladzie dostępne powinno być napięcie potrzebne do zasilenia takiej taśmy (12 V).
Możliwe jest również zwiększenie ilości zamontowanych diod, umieszczenia ich pod różnym kątem w celu doświetlenia klatki w odpowiednich obszarach.

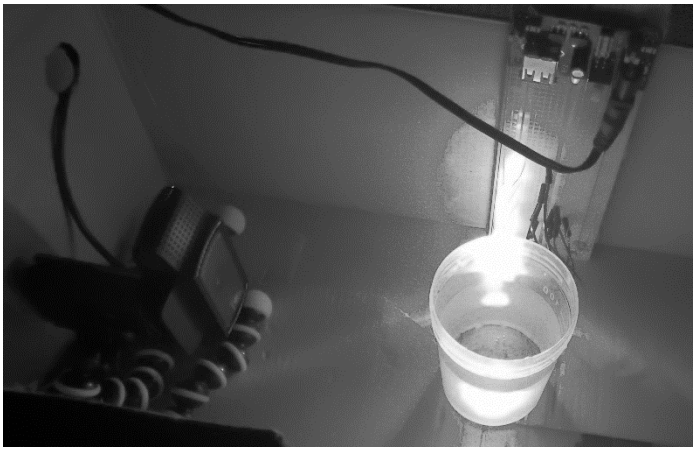
4.3. Testy różnych położeń oświetlacza

Przetestowano różne możliwe ustawienia oświetlacza w szufladzie:

- Nad kamerą poziomo (backlight) – Rys. 18
- Obok kamery pionowo (backlight)
- Z boku fiolki – Rys. 19

W wyniku testów ustalono, że najlepszym sposobem oświetlenia fiolki będzie ustawienie oświetlacza nad kamerą – brak refleksów na powierzchni pojemnika, dobre doświetlenie oraz wyraźne przejście kontrastu między taflą cieczy, a cieczą. Ze względu na brak wystarczającej ilości materiałów, nie sprawdzono kombinacji poszczególnych sposobów oświetlenia.
Klatki z poszczególnych pozycji oświetlacza przedstawiono na Rys. 20.

Rys. 18 Backlight



Rys. 19 Oświetlenie boczne

Rys. 20 Od lewej: backlight poziomy, oświetlenie boczne, backlight pionowy

5. Zniekształcenia obrazu wynikające z małych odległości

Przy małych odległościach istnieje obawa niedokładności wyznaczenia poziomu cieczy przez wpływ perspektywy (brak jednolitej bądź wąskiej tafli wody). W tym celu **pomiar będzie wykonywany na boku fiolki** (Rys. 21) – pozwoli to na jednoznaczne określenie poziomu cieczy.

Rys. 21 Wykonywanie pomiaru na brzegu fiolki pozwoli na uniknięcie błędów wynikających z perspektywy

Zniekształcenia geometryczne dla osi pionowej (a więc np. na brzegu fiolki wskazywanym przez prostokąt na Rys. 21) są stosunkowo niewielkie. Eksperymenty przeprowadzone na stanowisku doświadczalnym pokazały, że odchylenie pomiaru na długości 12 cm w odległości kamery od obiektu równej 10 cm wyniosło maksymalnie 3% (kamera Logitech HD Pro Webcam C920).
W razie zaistnienia potrzeby dokładnego określenia poziomu cieczy względem określonego punktu można dokonać kalibracji kamery za pomocą odpowiedniego arkusza kalibracyjnego lub zamontować na stałe wzornik długości obok fiolki.
Jak sygnalizowaliśmy w rozdziale 2.3, niewielka odległość kamery od obiektu może powodować problemy z głębią ostrości.
Wykorzystana do doświadczeń kamera (Logitech C920) ma możliwość programowej zmiany parametrów w trakcie pracy. Najważniejsze z nich to:

- Ekspozycja
- Kontrast
- Jasność
- Ostrość

Szczególnie ważna jest możliwość zmiany ostrości w trakcie pracy. Gdyby głębia ostrości przy ustawieniu kamery na ostrzenie na obiekcie była niewystarczająca np. do wyśledzenia toru igły, można podzielić działanie algorytmu na dwa etapy – śledzenie toru igły i pomiar poziomu cieczy, a następnie ustalić adekwatne ustawienie ostrości dla każdego z nich.

6. Położenie fiolki względem własnej osi

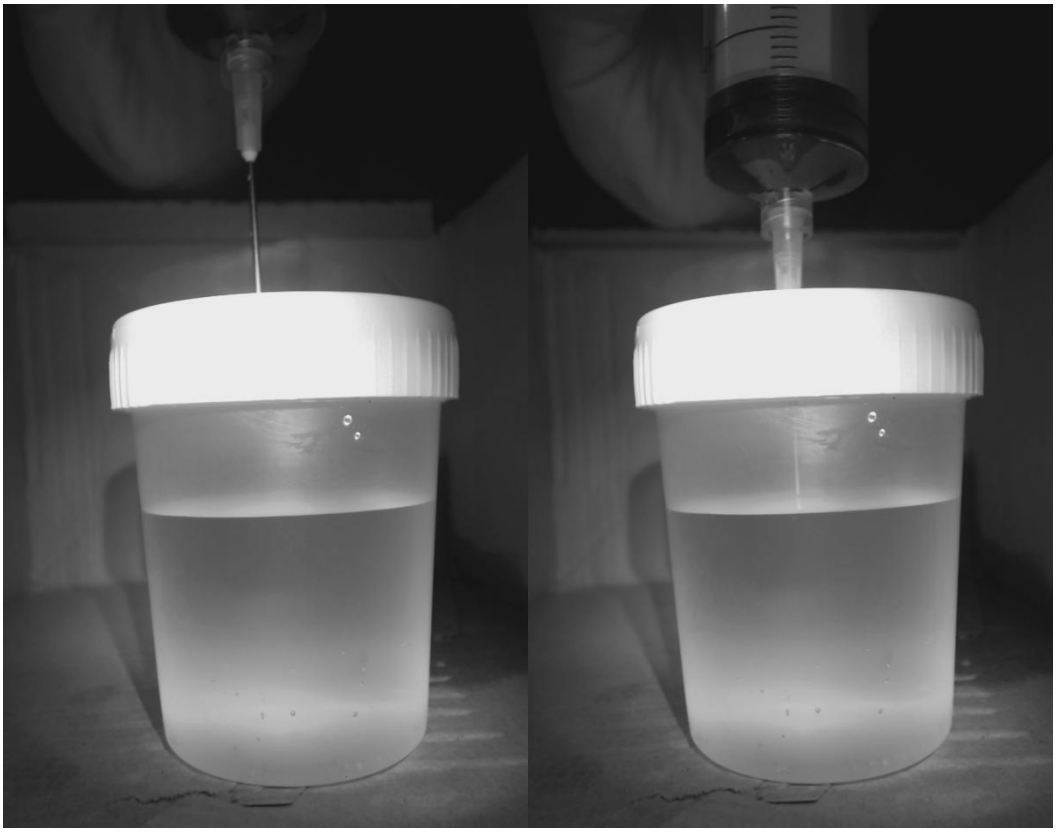
Fiolki mogą być w bardzo dużym stopniu zaklejone etykietą. Aby możliwe było dokonanie pomiaru, widoczny i transparentny musi być bok fiolki. Jeśli algorytm nie wykryje widocznego boku może wygenerować sygnał obrotu fiolki względem własnej osi, aż do uzyskania odpowiedniego jej ustawienia.

7. Kąt obserwacji

Jednym z problemów, które należało rozważyć w doświadczeniu, był wpływ kąta obserwacji kamery na dokładność pomiaru poziomu cieczy. Przy małej odległości jest on w dużym stopniu zmienny (do kilkudziesięciu stopni). Najprostszym sposobem eliminacji tego problemu jest zaproponowany wcześniej pomiar wysokości cieczy na względem boku fiolki. Pozwoli to jednocześnie na pominięcie wpływu kształtu fiolki (ewentualnego odchylenia od osi pionowej), bo podczas pomiaru z boku fiolki odległość pozostanie niezmienna.

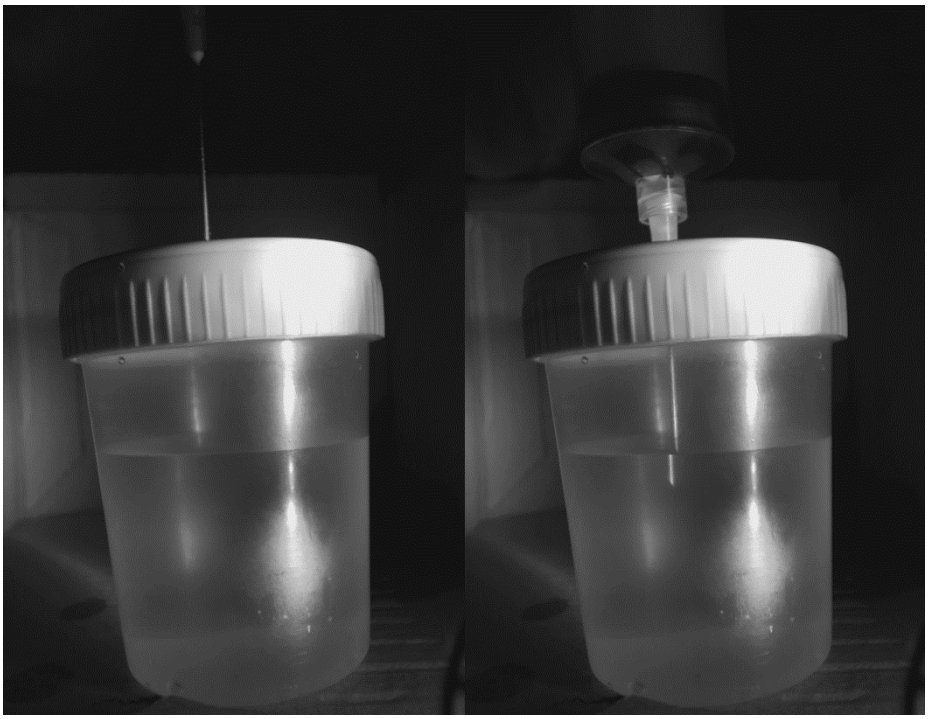
8. Oświetlenie, a pomiar położenia igły

Przeprowadzono testy wpływu różnego umiejscowienia oświetlenia na doświetlenie igły w trakcie procesu. Oświetlenie poprzez backlight umieszczony nad kamerą okazało się wrażliwe na zmniejszoną przeźroczystość pojemnika i jednocześnie fragment igły będący w cieniu wieczka pojemnika mógłby okazać się trudny do odróżnienia od reszty obrazu, jak widać na Rys. 22.

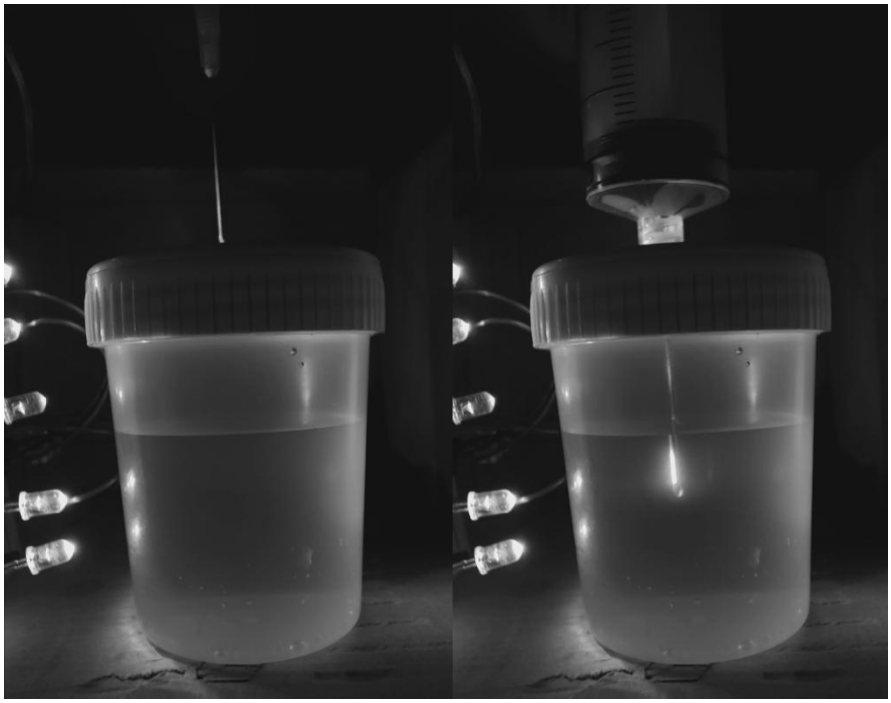


Rys. 22 Oświetlenie igły za pomocą poziomego oświetlenia backlight nad kamerą

W związku z tym sprawdzono oświetlenie igły przy innych ustawieniach oświetlacza, jak przedstawiono na Rys. 23 oraz Rys. 24.



Rys. 23 Oświetlenie igły za pomocą pionowego oświetlenia backlight obok kamery



Rys. 24 Oświetlenie igły za pomocą oświetlenia bocznego

Z eksperymentów wynika, że w docelowej konfiguracji pomocne będzie zamontowanie dodatkowego oświetlenia pionowego (obok głównego, poziomego) w celu lepszego doświetlenia igły w trakcie

pracy robota. Szczególnie wartościowe dla algorytmu wykrycia igły jest jej lepsze doświetlenie w cieniu zakrętki fiolki.

9. Testy algorytmu wykrywania poziomu cieczy

Na nagraniach powstałych w trakcie eksperymentów uruchomiono algorytm wykrywania poziomu cieczy, skonstruowany w trakcie wcześniejszych etapów projektu.
Pomimo braku kalibracji względem zupełnie innych warunków oświetleniowych uzyskano zadowalające wyniki wykrywania poziomu cieczy. Algorytm zostanie ulepszony o zdolność wykrywania poziomu w stosunku do boku fiolki.
Wynik działania algorytmu przedstawiono na Rys. 25.

Rys. 25 Wykrycie poziomu cieczy

10. Podsumowanie wniosków dotyczących wykonania szuflady z punktu widzenia systemu wizyjnego

- Wysokość szuflady powinna umożliwić pionowe umieszczenie kamery Logitech HD Pro Webcam C920. Wskazane jest, aby nad kamerą przewidziane było kilka centymetrów na oświetlacz złożony z kilku diod LED. Z tego względu najlepiej, aby **wysokość szuflady wynosiła nie mniej niż 20 cm**.
- **Szerokość szuflady** (Rys. 1) powinna umożliwić umieszczenie kamery tak, aby **odległość obiektywu kamery od fiolki wynosiła nie mniej niż 10 cm**. Projektując szufladę należy także uwzględnić grubość samej kamery, czyli dodatkowe 3.5 cm (przy czym w przypadku sugerowanej kamery C920 należy usunąć (obciąć) obrotową podstawkę, aby uzyskać grubość kamery 3.5 cm, w przeciwnym przypadku grubość kamery z podstawką wynosi 7 cm.
- **Oświetlenie: kilka diod LED lub taśma ledowa**. Szczegóły dotyczące położenia oświetlacza opisane są w rozdziale 4.
- **Chwytak powinien łapać fiolkę od góry** tak, aby jej nie przesłaniać
- **Chwytak powinien mieć możliwość obrotu fiolki wokół jej osi symetrii** tak, aby w przypadku gdy na części obwodu znajduje się etykieta, sygnał zwrotny z systemu wizyjnego powodował obrót fiolki i odsłonięcie brzegu fiolki nie zasłoniętego etykietą