

System bezpieczeństwa dla współpracującego robota przemysłowego na bazie kamer głębi

Dawid Masłowski¹, Michał Czubenko^{1,2}

¹ Intema Sp z o.o., ul. Siennicka 25a, 80-758 Gdańsk

² Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-980 Gdańsk

Streszczenie: W artykule zarysowano problematykę robotyzacji małych przedsiębiorstw, w szczególności aspekt robotyzacji z uwzględnieniem robotów współpracujących. Szeroko omówiono zagadnienie robotów współpracujących oraz bezpieczeństwa człowieka podczas takiej współpracy. Przedstawiono również najbardziej popularne systemy bezpieczeństwa w odniesieniu do obowiązujących norm. W głównej części artykułu przedstawiono Cooperating Automaton System with Stereovision Invigilating the Environment (CASSIE), system dedykowany do monitorowania bezpieczeństwa robotów kooperacyjnych za pomocą multimodalnych sensorów głębi. Ukazano również efekt działania takiego systemu.

Słowa kluczowe: system wizyjny, robot produkcyjny, system bezpieczeństwa, stereowizja, HSI

1. Wprowadzenie

Żyjemy w dobie szybko starzejącego się społeczeństwa, w chwili obecnej na rynku pracy panuje wręcz olbrzymi niedobór pracowników. Cywilizacja europejska upatruje rozwiązanie tego problemu w imigracji zarobkowej z krajów mniej uprzemysłowionych. Mimo postępującej imigracji (w 2016 r. do UE imigrowało około 2 mln obywateli, zaś w 2017 r. – 2,4 mln) tendencja niedoboru pracowników ma się pogłębiać – wskaźnik wakatów (ang. *job vacancy rate*) wzrósł z 1,3% w 2013 r. do 2,3% w 2019 r. [1]. Według raportu Boston Consulting Group, w 2030 r. w Polsce będzie brakować 5 mln pracowników. Na stanowiskach pracy odznaczających się dużą monotonią robot współpracujący może idealnie zastąpić człowieka. Aktualnie w większości przedsiębiorstw można zaobserwować postępującą robotyzację. W Europie w 2017 r. na 10 000 pracowników przypadało 106 robotów, w ścisłej czołówce światowej znajdują się Niemcy (309 – trzecie miejsce), Szwecja (223 – piąte) i Dania (211 – szóste) [2]. Polska zajmuje dopiero trzydzieste miejsce (32 roboty na 10 000 pracowników), mimo budowy jednego z bardziej przyjaznych robotów humanoidalnych [3]. Oznacza to, że istnieje olbrzymie zapotrzebowanie na robotyzację przedsiębiorstw.

W większości przypadków stanowiska zrobotyzowane eliminują człowieka z procesu produkcyjnego. Roboty ogro-

dzone są różnego rodzaju barierami, ogrodzeniami czy wręcz są zamknięte w klatkach. Historycznie manipulatory miały za zadanie przenoszenie i układanie ciężkich elementów, używały do tego dużej siły i prędkości, przez co stawały się niebezpieczne dla człowieka. Aktualnie odchodzi się od tego trendu. Coraz częściej pojawiają się roboty współpracujące z człowiekiem, charakteryzujące się mniejszym udźwigniem i zredukowaną prędkością. Dzięki temu są bezpieczniejsze dla człowieka [4]. Coraz częściej również pojawiają się *przyjazne*, w aspekcie HSI (ang. *Human System Interaction*) roboty produkcyjne, czasem nawet są wyposażone w dedykowany system emocjonalny, potrafią się uśmiechać, a nawet parzyć kawę [5].

2. Roboty współpracujące

Robot współpracujący, inaczej zwany *cobotem* (ang. *Cooperative robot*) został zdefiniowany jako „aparatusz i metoda umożliwiająca bezpośrednią fizyczną interakcję między człowiekiem a manipulatorami (ogólnego przeznaczenia) sterowanymi przez komputer” [6]. Jednak mimo zdefiniowania cobota w 1999 r., pierwsze modele weszły na rynek dopiero w 2003 r.

Ogólnie można zdefiniować cztery tryby współpracy człowieka i robota [7]:

- koegzystencja,
- sekwencyjna kooperacja (praca sekwencyjna nad obiektem),
- kooperacja (praca nad jednym obiektem, jednoczesny ruch robota i człowieka),
- kooperacja responsywna (praca nad jednym obiektem, reakcja bezpośrednio na ruch).

Aktualnie większość robotów pracuje w trybie sekwencyjnej kooperacji – nie ma ścisłej kooperacji między człowiekiem a robotem. Aczkolwiek postępująca robotyzacja sugeruje, że

Autor korespondujący:

Michał Czubenko, m.czubenko@intema.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 30.10.2019 r., przyjęty do druku 26.11.2019 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

w niedalekiej przyszłości będzie można spotkać roboty kooperujące responsywnie z człowiekiem.

Aby roboty mogły swobodnie współpracować z człowiekiem muszą spełniać szereg norm związanych z bezpieczeństwem, w szczególności ISO 10218-1, 10218-2 oraz specyfikację techniczną ISO/TS 15066. W dokumentach tych można znaleźć następujące strategie zachowania bezpieczeństwa [8]:

- ograniczenie strefy ruchu robota – statyczne (zdefiniowanie strefy pracy) lub dynamiczne (np. przez zastosowanie kurtyn świetlnych),
- wykrywanie odległości do potencjalnych obiektów mogących spowodować kolizję,
- wykrywanie i unikanie kolizji – *pre-collision* – dynamiczna zmiana trajektorii manipulatora lub prędkości narzędzia,
- wymagania ergonomiczne – unikanie ostrych krawędzi, okładziny itp.,
- systemy zatrzymania robota – *post-collision* – odpowiednio umieszczone wyłączniki awaryjne,
- wydajność systemu sterowania związana z bezpieczeństwem, tolerancja pojedynczych usterek nie może narażać człowieka,
- kontrola prędkości – prędkość narzędzia nie powinna przekroczyć 250 mm/s (przy współpracy).

Uszczegóławiając przypadek tylko do współpracy z człowiekiem, raport techniczny ISO/TS 15066 wyróżnia cztery tryby związane z tym zagadnieniem:

- monitoring otoczenia robota (*safety-related monitored stop* – SMS),
- monitoring prędkości i odległości (*speed and separation monitoring* – SSM),
- praca przy ograniczonej sile (*power and force limiting* – PFL),
- praca z prowadzeniem ręcznym (*hand guiding* – HG).

Praca z prowadzeniem ręcznym jest z reguły trybem opcjonalnym, zaś ograniczenie siły robota jest z reguły predefiniowane podczas określania ryzyka i instalacji. Pozostałe tryby wiążą się ściśle ze strategiami bezpieczeństwa: *pre-collision* i *post-collision* [9]. Strategia *pre-collision* powinna opisywać, co się dzieje w przypadku dostania się przeszkody w przestrzeni robota (SSM), z kolei strategia *post-collision* mówi, jak się powinien zachować manipulator w przypadku kolizji (SMS). Należy zauważyć, że aspekt *pre-collision* jest ściśle związany z zagadnieniem percepcji otoczenia, a stąd już krok do *inteligentnych* cobotów [10].

Strategię *pre-collision* można również powiązać z wykrywaniem przeszkody/człowieka w odpowiednich strefach. Klasycznie wyróżnia się pięć różnych stref robota:

- przestrzeń maksymalna – zbiór punktów, w których może się znaleźć jakakolwiek część robota,
- przestrzeń ograniczona – przestrzeń maksymalna ograniczona przez elementy stałe (np. szafę sterowniczą),
- przestrzeń robocza – zbiór punktów, w których może się znaleźć narzędzie robota,
- przestrzeń chroniona – przestrzeń, która powinna zostać ograniczona przez odgródzenie wg normy ISO 13857 (z reguły większa niż przestrzeń maksymalna),
- przestrzeń kooperacji – wycinek przestrzeni roboczej, w której może się pojawić człowiek w celu współpracy.

W celach bezpośrednio związanych z systemem bezpieczeństwa wykorzystuje się trzy ostatnie przestrzenie.

3. Systemy bezpieczeństwa cobotów

Istnieje stosunkowo niewiele producentów mających w swojej ofercie coboty, do najważniejszych z nich należą firmy: General Motors, Corobotics, KUKA, Universal Robots, Fanuc i ABB [11]. Jednak zakup samego cobota to nie wszystko. Producenci oferują możliwość instalacji dostosowanej do

warunków pracy systemu bezpieczeństwa, przez co koszt takiego cobota może znacząco wzrosnąć. Wśród powszechnie stosowanych rozwiązań służących do monitorowania bezpieczeństwa strefy chronionej robota należy wyróżnić:

- sygnalizacyjne i ostrzegawcze barwy elementów stanowiska i samych robotów,
- fizyczne wygrozdzenia i osłony (częściowe) ograniczające strefę kooperacji,
- optyczne bariery strefowe,
- naciskowe maty i listwy,
- klucze bezpieczeństwa,
- sensory ruchu i odległości,
- systemy wykrywania kolizji.

Przykładowo Fanuc ma w swojej ofercie serię robotów CR (ang. *Cooperative Robots*) wyposażonych domyślnie w system detekcji kolizji przy wykryciu siły rzędu 150 N (z możliwością przeprogramowania progu), oparty na sensorach momentu siły [12]. Umożliwia wyposażenie manipulatora w maty ochronne oraz system wodzenia manipulatorem. Pozwala także na użycie systemu DCS (ang. *Dual Check Safety*), który pozwala na monitorowanie stref robota pod kątem obecności człowieka (zarówno przez kurtyny świetlne, skaner 3D czy maty naciskowe) oraz redukcję prędkości i sił. Aby chronić narzędzie manipulator może być wyposażony w czujnik momentów sił oraz kamery pozwalające na monitorowanie otoczenia robota. System ten jest również odpowiednio redundantny.

Podobne zastosowanie ma osprzęt firmy Bosch – APAS *assistant*. System ten umożliwia okrycie manipulatora sztuczną matą dotykową o grubości rzędu 50 mm, dzięki czemu wykrywa on kolizje wcześniej niż robot uderzy w człowieka. APAS pozwala również na monitorowanie otoczenia robota przez użycie dodatkowych sensorów, takich jak skanery laserowe, bariery świetlne, maty dotykowe czy skaner 3D.

Również robot iwa LBR firmy KUKA został wyposażony w system detekcji kolizji za pomocą czujnika momentów sił. Należy zaznaczyć, że pod tym pojęciem kryją się z reguły osobne sensory dla każdego stopnia swobody [13]. Tym, co wyróżnia tego cobota, jest elastyczne narzędzie, które umożliwia dopasowanie składanych elementów (a także umiejętność obsługi ekspresu do kawy – według filmu promującego). Może być również wyposażony w sensory strefowe, które definiują określone prędkości cobota, a także siły, bądź sam sposób działania algorytmów bezpieczeństwa (inne do współpracy z człowiekiem, inne do samodzielnej manipulacji).

Wśród ciekawych koncepcji należy wyróżnić *wirtualny sensor siły* – opracowany na podstawie pełnego modelu dynamiki robota. Pozwala on na wyliczenie momentu obrotowego dla każdego silnika (w każdym stopniu swobody), co jest proporcjonalne do poboru prądu pomierzonego na silnikach. W przypadku kolizji różnica między wyznaczonym poborem prądu a pomierzonym jest znacząca, dzięki temu *wirtualny czujnik* może wykryć kolizję [12, 14]. Sensor taki jest stosowany w cobotach Universal Robots.

W podejściu badawczym stosowane są bardziej wyrafinowane rozwiązania, jednak aktualnie są one jeszcze zbyt mało odporne na warunki przemysłowe. Coraz częściej stosuje się wizyjne systemy zabezpieczające przed kolizją – monitorowanie przestrzeni chronionej robota. Wiodącym rozwiązaniem w tej dziedzinie są różnego rodzaju skanery 3D, które z reguły należą do rozwiązań z wyższej półki cenowej. Z tego tytułu coraz częściej stosowane są kamery głębi, czy to bazujące na ToF (ang. *Time of Flight*), czy na emiterach podczerwieni [15]. Wśród dominujących rozwiązań badawczych można wymienić następujące główne aspekty:

- wyznaczenie zajętości strefy (odległości człowieka/obiektu od robota) za pomocą podejścia:
 - klasycznego – z użyciem kamer RGB i algorytmów przetwarzania obrazu [16],

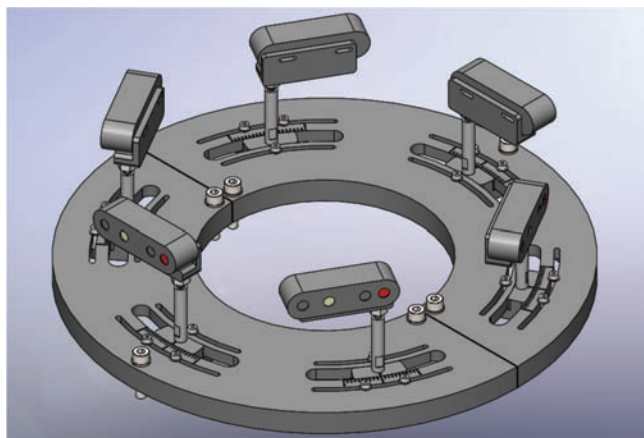
- 3D - z użyciem LIDARów, skanerów 3D i tym podobnych [17],
- hybrydowego, opartego na fuzji danych z wielu multimodalnych źródeł [18];
- predykcja trajektorii ruchu człowieka.

Najnowsze podejścia oparte są na fuzji danych z wielu kamer RGB i sensorów głębi. Przykładowo, system z kamerą RGBD [19] pozwala na dynamiczną zmianę trajektorii robota KUKA przy ruchomych przeszkodach. Z kolei system z kamerą ToF [20] skutecznie wykrywa zajętość strefy współpracy między człowiekiem i robotem.

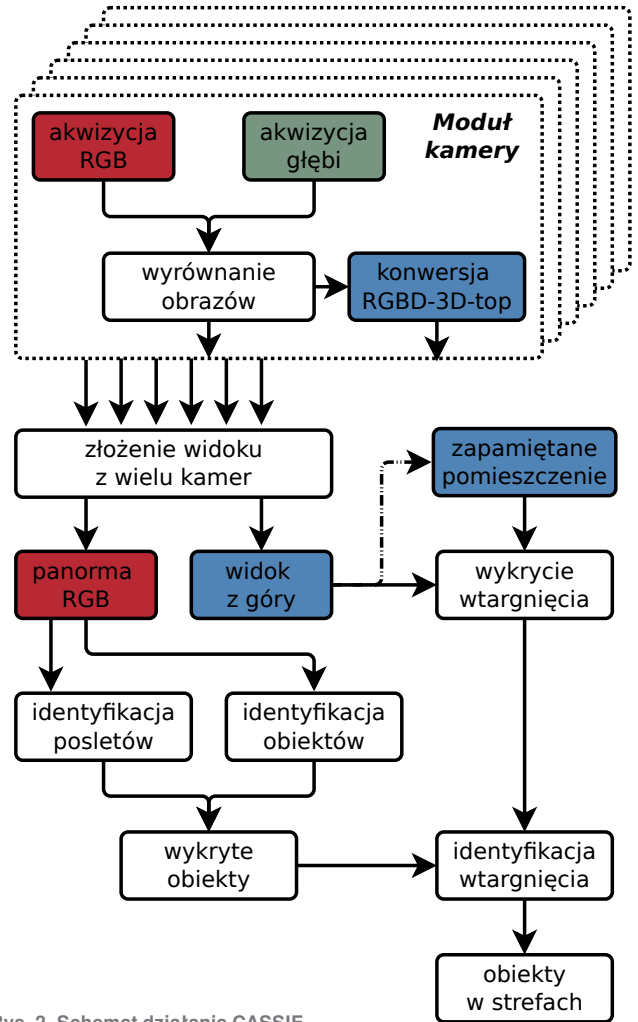
4. CASSIE

Cooperating Automaton System with Stereovision Invigilating the Environment, czyli CASSIE, jest systemem opracowanym w firmie Intema. Umożliwia detekcję obiektów wkraczających do przestrzeni chronionej robota. CASSIE składa się z sześciu modułów o polu widzenia ≈ 60°, co pozwala na skuteczne monitorowanie przestrzeni wokół robota. Pojedynczy moduł oparty jest na multimodalnym sensorze Intel RealSense D435, w skład którego wchodzi procesor wizyjny Intel Vision D4, emiter podczerwieni, stereo-para kamer podczerwieni oraz kamera RGB. Warto wspomnieć, że prace dotyczące bezpieczeństwa człowieka podczas współpracy z robotem z wykorzystaniem sensora RealSense toczą się praktycznie od debiutu tego czujnika [21]. CASSIE (rys. 1) jest systemem hybrydowym, którego pośrednim zadaniem jest fuzja danych z wielu źródeł.

Schemat działania systemu CASSIE przedstawiony jest na rys. 2. Szczegóły teoretyczne akwizycji oraz algorytmów przetwarzania obrazu z kamery RGBD są opisane w publikacjach [22-26]. Procesor wizyjny kamery Intel RealSense pozwala na bezpośrednie pobranie danych o głębi wyznaczonych na podstawie zrektyfikowanych obrazów z kamer podczerwieni wraz z korektą o dane z aktywnej stereowizji (za pomocą emitera IR). Należy zaznaczyć, że proces rektyfikacji polega na usunięciu zniekształceń wprowadzonych przez parametry sensora/sensorów i przekształceniu do układu kanonicznego kamer. Wśród algorytmów do uzyskania danych o głębi można wymienić m.in. *stereo block matching* lub *stereo semi-global block matching*, które polegają na dopasowaniu bloków punktów na obrazach. Biblioteka *librealsense2* dostarczana przez firmę Intel umożliwia mapowanie danych z płaskiego obrazu do przestrzeni trójwymiarowej oraz wyrównanie obrazów pobranych z kamery RGB i obrazu głębi (kanał D). Wyrównanie obrazów polega na znalezieniu zależności opisującej relacje między odpowiednimi pikselami (wskazującymi na ten sam punkt w przestrzeni) na obrazach. Dzięki temu, nakładając obrazy na siebie można mieć pewność,



Rys. 1. Wizualizacja systemu CASSIE
Fig. 1. Visualization of CASSIE system



Rys. 2. Schemat działania CASSIE
Fig. 2. CASSIE flow chart

że punkt w przestrzeni będzie poprawnie scharakteryzowany zarówno przez dane o odległości od kamery, jaki i kolor.

Wyrównane obrazy z pojedynczych kamer (RGB i D) przetwarzają się do postaci chmury punktów 3D (ang. *point cloud*), co pozwala na szybkie określenie odległości od poszczególnych obiektów. Następnie chmura przetwarzana jest na widok z góry, odpowiednio przesunięty (kątowno) dla każdej z kamer. Do opracowania tego widoku nie są uwzględniane punkty leżące poniżej pewnego poziomu (np. składowej *y* środka obrazu). Punkty te mogą przynależać do podłoża platformy robota lub posadzki. Z kolei pozyskane obrazy RGB z każdego modułu są odpowiednio składane, aby uzyskać kolorowy widok panoramiczny. Należy zaznaczyć, że poprawna rektyfikacja obrazu, bardzo trudna do wykonania w systemie wielokamerowym, nie jest wymagana do wykrycia obiektów w otoczeniu robota.

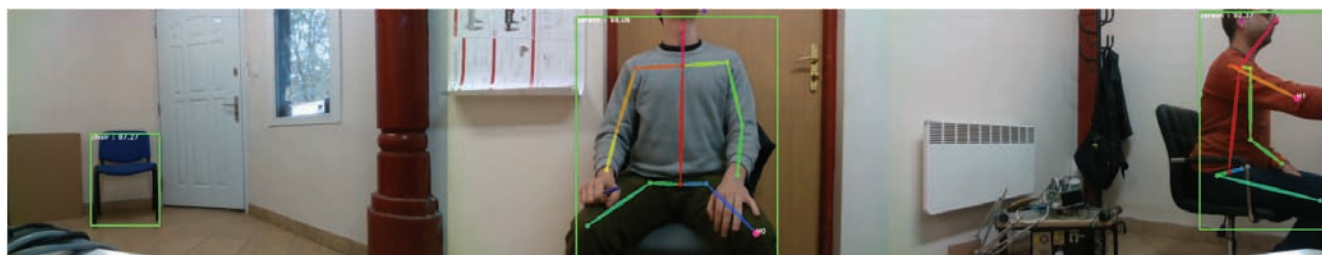
Widok z góry jest podczas kalibracji zapamiętywany (gdy w żadnej z kamer nie znajdują się ruchome obiekty). Dzięki temu system jest w stanie określić granice ruchomego pomieszczenia (ściany), w którym znajduje się robot. Docelowo umożliwia to rozróżnienie między nowymi obiektami, poruszającymi się w otoczeniu, a obiektami stałymi (jak np. klatka robota). Dzięki temu staje się możliwe wykrycie (arbitralnie) większych obiektów wkraczających lub zbliżających się do przestrzeni chronionej robota.

Widok panoramiczny (złożenie obrazów RGB) pozwala na detekcję i identyfikację semantyczną obiektów (wśród których należy wyróżnić człowieka). Obiekty te są wykrywane i rozpoznawane za pomocą głębokiej sieci neuronowej YOLO [27]. Takie rozwiązanie pozwala np. na rozpoznanie wózka widłowego, palety lub człowieka wkraczającego w przestrzeń chronioną robota. Należy zauważyć, że identyfikacja zbliżającego

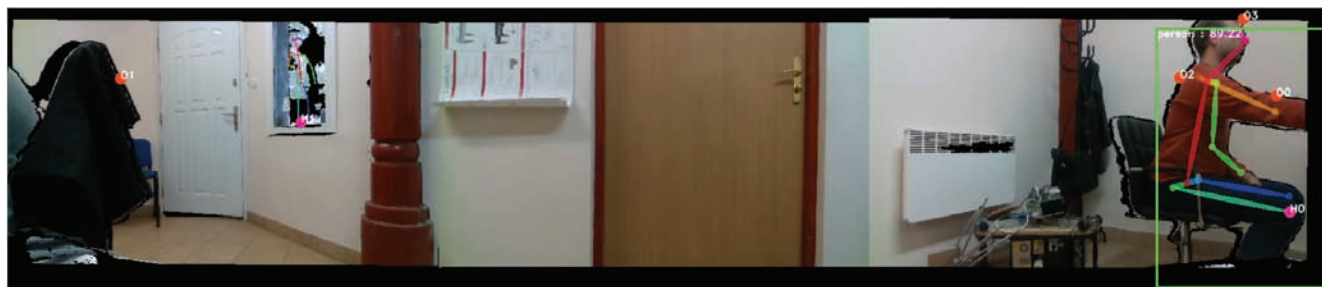
się człowieka za pomocą sieci YOLO nie jest w pełni dokładna. Działa ona skutecznie, gdy cały korpus człowieka jest dokładnie widoczny i nie zlewa się z innymi obiektami. Dlatego też jako element uzupełniający sieć YOLO wykorzystano bibliotekę OpenPose, pozwalającą na określenie *poseleta* czyli *szkieletu* człowieka [28]. Poselet pozwala na skuteczne wykrycie nawet fragmentu korpusu człowieka, jednocześnie umożliwiając określenie pikseli przynależnych do niego (na co sieć YOLO już nie pozwala). Przetwarzając informacje z obu detektorów system CASSIE określa listę wykrytych obiektów w otoczeniu robota. Przykładową panoramę wraz z wykrytym człowiekiem za pomocą sieci YOLO (ang. *bounding box*) oraz OpenPose (poselet) przedstawiono na rys. 3.

Znając położenie obiektów na obrazie panoramicznym oraz przynależność pikseli do obiektów, można określić ich odległość od robota (w oparciu o widok z góry). Dzięki temu możliwe jest wykrycie wtargnięcia człowieka, bądź dużego obiektu w odpowiednią strefę robota. Jednocześnie widok z góry umożliwia bezpośrednio wykrycie wtargnięcia za pomocą prostego algorytmu rozpoznającego ruch w obrębie zapamiętanego pomieszczenia. Tłumacząc koordynaty z obrazu z góry na obraz panoramiczny, możliwe jest jednoznaczne rozpoznanie wkraczających w daną sferę obiektów.

Przykładowy zrzut ekranu prezentujący działanie systemu bezpieczeństwa przedstawiono na rys. 4. Obraz panoramiczny (górny) przedstawia złożenie widoku z trzech kamer RGB patrzących na wprost od manipulatora, w odległości około 200 mm od środka ramienia, przesuniętych względem siebie o około 60°. Każdy kolorowy obraz pobrany z sensora, jest odpowiednio wyrównany do obrazu głębi, można więc zaobserwować niewielkie przestrzenie wypełnione nieznaną informacją (kolor czarny). Na widoku panoramicznym można znaleźć *bounding box* z wykrytym obiektem – człowiekiem – z pewnym prawdopodobieństwem ($\approx 89\%$) ukazującym stopień trafności identyfikacji obiektu [27]. Jednocześnie zaobserwować można *poselet* – szkielet wykryty za pomocą algorytmów analizy obrazu oraz sieci neuronowych z biblioteki OpenPose [28]. Na widoku z góry (dolna część rys. 4) można zaobserwować mapę otoczenia robota (duża czerwona kropka w pobliżu centrum) wraz ze strefami bezpieczeństwa (okręgi: czerwony, pomarańczowy, żółty i zielony, odległe od siebie o 500 mm) oraz zakresem widoku z kamer (czerwone, zewnętrzne linie wychodzące z punktu, w którym znajduje się kamera pokazują zasięg głębi, zaś zielone, wewnętrzne linie – zasięg RGB). Na obu ilustracjach można znaleźć punkt różowy (z literą H) – oznaczający wykrytego człowieka (umieszczony w punkcie przynależnym do szkieletu i jed-



Rys. 3. Widok panoramiczny z 3 kamer bez wyrównania
Fig. 3. Panorama view without align



Rys. 4. Widok panoramiczny z trzech kamer wyrównany do kamer głębi (górną część) oraz widok otoczenia z góry
Fig. 4. Aligned panorama view (top image) and map of robot environment

nocześnie znajdującym się najbliższej robota) oraz pomarańczowe (z literą O) – oznaczające wykryte *duże* obiekty. Należy zwrócić uwagę, że człowiek jest wykryty zarówno przez YOLO, OpenPose oraz jako duży obiekt (wręcz w trzech różnych miejscach) – system jest celowo redundantny. Dodatkowo obiekt znajdujący się w odległości około 1 m od robota, oznaczony, jako O1, również został wykryty (lecz nie rozpoznany).

Aplikacja systemu bezpieczeństwa została zintegrowana z systemem sterowania manipulatorem za pomocą systemu ROS. W momencie połączenia ze sterownikiem robota widok z kamer jest uaktualniany na bieżąco, w zależności od pozycji manipulatora. Przeszukiwanie w czasie *quasi-rzeczywistym* całej przestrzeni chronionej robota jest zagadnieniem bardzo złożonym obliczeniowo. Dlatego na bieżąco obserwowane jest zawsze 180° w kierunku, w którym jest skierowane ramię manipulatora (maksymalnie obraz z 4 kamer). Dzięki takiemu rozwiązaniu projekt autonomicznego robota współpracującego spełnia wymogi bezpieczeństwa opisane w ISO/TS 15066, w szczególności pozwala na spełnienie standardów pracy z zapewnieniem monitorowanej prędkości i odległości człowieka i robota SSM (ang. *Speed and Separation Monitoring*).

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję systemu bezpieczeństwa (CASSIE) opartą na kamerach RGBD pozwalających na analizę otoczenia robota w czasie *quasi-rzeczywistym*. Kamery RGBD mające zasięg w zakresie 0,15–4,5 m pozwalają jednoznacznie wyznaczyć mapę otoczenia robota, zarówno w 2D (widok z góry) jak i finalnie w trójwymiarze. Dzięki zastosowanym algorytmom widzenia maszynowego możliwe jest monitorowanie stref bezpieczeństwa robota (zewnętrznej – bezpiecznej; środkowej – współpracy; wewnętrznej – niebezpiecznej) oraz sprawdzanie, jakie obiekty lub postacie się w nich znajdują. Należy zwrócić szczególną uwagę, że każdy element wkraczający w strefę współpracy zmniejsza prędkość robota, zaś każdy w strefie wewnętrznej wywołuje alarm i finalnie zatrzymuje manipulator. System CASSIE dedykowany jest cobotom mogącym współpracować z człowiekiem, dlatego w dalszych pracach planowana jest predykcja zachowania człowieka. Przedstawiony system należy dodatkowo wyposażyć w system pozwalający na detekcję kolizji, oparty np. na sensorach momentu siły. Dzięki temu zabiegowi, zarówno strategia *pre-collision* jak i *post-collision* zostanie wdrożona.

Podziękowania

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Projekt realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: Szybka Ścieżka, Działania: Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałanie: Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa; PO IR.01.01.01-00-0074/17.



Bibliografia

- Eurostat (2019): *Job vacancies between 2017 and 2019*.
- Dhiraj A.B., *Countries with the Most Industrial Robots per 10,000 Employees*, "Ceoworld Magazine", 14. 03. 2018.
- Kowalczyk Z., Czubenko M., *Przegląd robotów humanoidalnych*, "Pomiary Automatyka Robotyka", R. 19, Nr 4, 2015, 33-42, DOI: 10.14313/PAR_218/33.
- Kulik J., Wojtczak Ł., *Bezpieczna interakcja człowieka z robotem – realna potrzeba czy chwilowy trend wśród krajowych MSP*, "Pomiary Automatyka Robotyka", R. 22, Nr 1, 2018, 67–74, DOI: 10.14313/PAR_227/67.
- Kowalczyk Z., Czubenko M., *Computational approaches to modeling artificial emotion—an overview of the proposed solutions*, "Frontiers in Robotics and AI", 21, 2016, DOI: 10.3389/frobt.2016.00021.
- Colgate J.E., Peshkin M.A., *Cobots*, US Patent 5,952,796, 1999.
- IFR International Federation of Robotics, *Demystifying Collaborative Industrial Robots*, 2018.
- Michalos G., Makris S., Tsarouchi P., Guasch T., Kontovrakis D., Chryssolouris G., *Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces*, "Procedia CIRP", Vol. 37, 2015, 248–253, DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.
- Long P., Chevallereau C., Chablat D., Girin A., *An industrial security system for human-robot coexistence*, "Industrial Robot: An International Journal", Vol. 45, No. 2, 2018, 220–226, DOI: 10.1108/IR-09-2017-0165.
- Kowalczyk Z., Czubenko M., *Intelligent decision-making system for autonomous robots*, "International Journal of Applied Mathematics and Computer Science", Vol. 21, No. 4, 2011, 671–684, DOI: 10.2478/v10006-011-0053-7.
- Cobotsguide, *Cobot Comparison Chart*, 2019.
- Yen S.-H., Tang P.-C., Lin Y.-C., Lin C.-Y., *Development of a Virtual Force Sensor for a Low-Cost Collaborative Robot and Applications to Safety Control*, "Sensors", Vol. 19, No. 11, 2019, DOI: 10.3390/s19112603.
- Albu-Schäffer A., Haddadin S., Ott C., Stemmer A., Wimböck T., Hirzinger G., *The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments*, "Industrial Robot: An International Journal", Vol. 5, 2007, 376–385, DOI: 10.1108/01439910710774386.
- Popov D., Klimchik A., Mavridis N., *Collision detection, localization & classification for industrial robots with joint torque sensors*, [in:] 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), IEEE, 2017, 838–843, DOI: 10.1109/ROMAN.2017.8172400.
- Halme R.-J., Lanz M., Kämäräinen J., Pieters R., Latokartano J., Hietanen A., *Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration*, "Procedia CIRP", Vol. 72, 2018, 111–116, DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.043.
- Winkler A., Suchý J., *Vision based collision avoidance of industrial robots*, "IFAC Proceedings Volumes", Vol. 44, No. 1, 2011, 9452–9457, DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00472.
- Kaldestad K.B., Haddadin S., Belder R., Hovland G., Anisi D.A., *Collision avoidance with potential fields based on parallel processing of 3D-point cloud data on the GPU*, [in:] International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014, 3250–3257, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907326.
- Yang S., Xu W., Liu Z., Zhou Z., Pham D.T., *Multi-source vision perception for human-robot collaboration in manufacturing*, [in:] 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), IEEE, 2018, 1–6, DOI: 10.1109/ICNSC.2018.8361333.
- Saveriano M., Lee D., *Distance based dynamical system modulation for reactive avoidance of moving obstacles*, [in:] International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014, 5618–5623, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907685.
- Ahmad R., Plapper P., *Human-Robot Collaboration: Two-fold strategy algorithm to avoid collisions using ToF sensor*,

- "International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing", Vol. 4, No. 2, 2015, 144–147, DOI: 10.7763/IJMMM.2016.V4.243.
21. Varhegyi T., Melik-Merkumians M., Steinegger M., Halmetschlager-Funek G., Schitter G., *A Visual Servoing Approach for a Six Degrees-of-Freedom Industrial Robot by RGB-D Sensing*, "Automation and Robotics", 2017, DOI: 10.3217/978-3-85125-524-9-14.
 22. Grunnet-Jepsen A., Winer P., Takagi A., Sweetser J., Zhao K., Khuong T., Nie D., Woodfill J., *Using the Intel RealSense Depth cameras D4xx in Multi-Camera Configurations*. Intel.
 23. Stefańczyk M., Kornuta T., *Akwizycja obrazów RGBD: metody*, "Pomiary Automatyka Robotyka", R. 18, Nr 1, 2014, 82-90, DOI: 10.14313/PAR_203/82.
 24. Kowalczyk Z., Merta T., *Wizualizacja obrazu stereowizyjnego w systemie VISROBOT*, "Pomiary Automatyka Kontrola", R. 60, Nr 10, 2014, 803–808.
 25. Kowalczyk Z., Merta T., *Three-dimensional mapping for data collected using variable stereo baseline*, [in:] 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), IEEE, 2016, 1082–1087, DOI: 10.1109/MMAR.2016.7575288.
 26. Merta T., *Odzworowanie obiektów ograniczonego środowiska na trójwymiarowej mapie cyfrowej z wykorzystaniem robotów mobilnych zaopatrzonych w stereowizje*, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2019.
 27. Redmon J., Farhadi A., *YOLOv3: An incremental improvement*, "arXiv preprint arXiv:1804.02767", 2018.
 28. Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y., *OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields*, "arXiv preprint arXiv:1812.08008", 2018.

Safety System for an Industrial Cooperating Robot Based on Depth Cameras

Abstract: This article outlines the problems of robotization in small production enterprises, in particular the aspect of their robotization with collaborating robots. The issue of cobots, especially the human security aspect in such a cooperation has been presented. The most popular safety systems in relation to applicable standards has been also presented. The main part of the article shows the Cooperating Automaton System with Stereovision Invigilating the Environment (CASSIE), a system dedicated for safety monitoring of cobot environment using multimodal depth sensors. The effect of such a system has also been shown.

Keywords: vision system, production robot, inspection system, machine learning, HSI

mgr inż. Dawid Masłowski

.maslowski@intema.pl

ORCID: 0000-0003-3877-0070

Założyciel firmy Intema zajmującej się budową maszyn. Od ośmiu lat jest zaangażowany w rozwiązywanie problemów technicznych, zarówno w ramach prowadzonych projektów, również jako konsultant w firmach zewnętrznych. Zrealizował ponad 150 stanowisk zautomatyzowanych. Wspólnie ze współpracownikami zaprojektował i wdrożył system monitoringu personalnego w ramach akceleratora Space3AC. Aktualnie prowadzi dwa projekty badawcze dofinansowane przez NCBiR: robot współpracujący oraz system automatycznego pobierania próbek suchej kropli matrycy. Wśród jego zainteresowań można wyróżnić nowoczesne technologie i ich wpływ na rynek pracy, ekonomię, zarządzanie oraz kolarstwo.



dr inż. Michał Czubenko

m.czubenko@intema.pl

ORCID: 0000-0002-9483-4983

Absolwent Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w dyscyplinie automatyka i robotyka – 2009 r. Obecnie jest adiunktem na tym samym wydziale, związanym z Katedrą Systemów Decyzji i Robotyki. Jednocześnie pracuje w firmie Intema Sp. z o.o. W 2012 r. odbył trzymiesięczny staż w Kingston University London. Był wiceprzewodniczącym Komitetu Organizacyjnego 12. Międzynarodowej Konferencji „Diagnostyka Procesów i Systemów” w 2015 r. W 2017 r. obronił z wyróżnieniem rozprawę doktorską „Antropoidalny Model Inteligentnego Systemu Decyzyjnego dla Jednostek Autonomicznych”. Aktualnie zajmuje się modelowaniem emocji dla systemów autonomicznych. Obszar jego zainteresowań to sztuczna inteligencja, robotyka i psychologia. Wśród głównych publikacji można wyróżnić dwa artykuły na liście JCR oraz sześć prac indeksowanych w Web of Science. Wskaźnik cytowań w Google Scholar właśnie przekroczył 150. Jego zainteresowania pozanaukowe obejmują szachy, grę na gitarze, trekking i żeglarstwo.

