

W jakim zakresie nowoczesna sztuczna inteligencja może być zastosowana w inteligentnych budynkach

Ryszard Tadeusiewicz

Wprowadzenie

Wyposażenie składające się na nowoczesny system techniczny nazywany inteligentnym budynkiem staje się coraz łatwiej dostępne, stąd rośnie liczba realizacji technicznych, którym przypisuje się miano budynku inteligentnego (rys. 1). Pojawia się jednak uzasadniona wątpliwość, czy wszystkie te zrealizowane systemy, a także nowe rozwiązania, oferowane przez wyspecjalizowane firmy, rzeczywiście zasługują na miano budynku inteligentnego?

Żeby odpowiedzieć na to pytanie, spróbujmy sięgnąć do definicji inteligencji, a potem sprawdzimy, w jakim stopniu obiekty techniczne zwane inteligentnymi budynkami – są w stanie sprostać wymaganiom wynikającym z tej definicji.

Popularne źródło przeglądowych informacji, jakim jest Wikipedia, proponuje na stronie <http://pl.wikipedia.org/wiki/Inteligencja> między innymi następującą definicję:

Inteligencja – rodzaj szczególnej sprawności umysłowej.

Jest to piękna i krótka definicja, ale w kontekście tego artykułu niestety nieprzydatna, bo mówienie o sprawności umysłowej budynku mogłoby wzbudzić zastrzeżenia nawet u najbardziej wyrozumiałych Czytelników. Na szczęście na tej samej stronie znaleźć można inną definicję:

Inteligencja – zdolność do postrzegania, analizy i optymalnej (lub zbliżonej do optymalnej) adaptacji do zmian otoczenia.

W definicji tej pominięto wzmiankę o „umysłowym charakterze” rozważanej zdolności (występująca w oryginalnym cytacie w Wikipedii), bowiem taka „okrojona” definicja daje już podstawy do konstruktywnej dyskusji na temat tego, jak wiele inteligencji mamy dziś w inteligentnych budynkach.

Dla wzbogacenia dyskusji spróbujmy jeszcze odnieść się do innych definicji inteligencji, bo Wikipedia nie uchodzi za najbardziej miarodajne źródło informacji (co nie przeszkadza, że wszyscy i zawsze chętnie z niej korzystamy). Znacznie bardziej szanowany *Słownik języka polskiego* definiuje pojęcie inteligencji następująco:

Inteligencja to zdolność rozumienia otaczających sytuacji i znajdowania na nie właściwych, celowych reakcji.

Słabością tej definicji jest fakt występowania w niej czasownika „rozumienie”. Próba dyskusji na temat tego, czy maszyna jest zdolna do rozumienia, prowadzi do jeszcze trudniejszych dywagacji niż źródłowe pytanie (czy obiekt techniczny,

Streszczenie: W wielu opracowaniach dotyczących wykorzystania nowoczesnych technologii teleinformatycznych w wyposażeniu nowoczesnych domów używa się nazwy „inteligentne budynki”. W istocie jest to jednak nadużycie, gdyż przy dzisiejszym stanie zaawansowania techniki systemów rozproszonej automatyki, stosowanych nawet w bardzo nowoczesnych budynkach – do prawdziwej sztucznej inteligencji jest im daleko. W artykule omówiono krótko wymagania, jakie powinny spełniać systemy automatyki zastosowane w budynkach, żeby można było mówić o inteligencji tych budynków. Nieco obszerniej na podstawie oryginalnych prac badawczych i projektowych przedstawiony jest problem inteligentnego automatycznego monitoringu wnętrza budynku w celach ochrony jego bezpieczeństwa. Przedstawiona i przedyskutowana jest także nowatorska koncepcja systemu z semantyczną analizą obrazów, stanowiąca całkowitą nowość w kontekście systemów ochrony używanych w inteligentnych budynkach.

Słowa kluczowe: inteligentne budynki, sztuczna inteligencja, systemy bezpieczeństwa, semantyczna analiza obrazów, automatyczne rozumienie.

THE EXTENT TO WHICH ARTIFICIAL INTELLIGENCE CAN BE APPLIED TO THE INTELLIGENT BUILDINGS

Abstract: In many papers and books concerning new ICT methods and tools used in buildings term “Intelligent building” is used and promoted. In fact in many cases use of such term is not justified and sometimes is a kind of overuse. In up-to-date systems of distributed automatic control used in buildings artificial intelligence is almost absolutely absent. In paper some requisitions and conditions necessary for use adjective “intelligent” for modern building furnishings technologies are presented and discussed. More detail discussion is presented for special kind of building furnishings, namely intelligent systems for monitoring of interior and surroundings of discussed buildings. For this purpose original idea of semantic images analysis as well as automatic understanding of security conditions are presented and discussed. Such system can be used in further buildings security purposes.

w szczególności budynek, może być inteligentny), więc sięgnijmy do jeszcze jednej definicji, którą przynosi Wielka Internetowa Encyklopedia Multimedialna. Określa ona inteligencję jako:

zespół zdolności umożliwiających jednostce korzystanie z nabytej wiedzy przy rozwiązywaniu nowych problemów i racjonalnym zachowaniu w różnych sytuacjach.



Rys. 1. Jedna z setek nowoczesnych budowli, jakie zostają przedstawione po wpisaniu do wyszukiwarki internetowej hasła „inteligentny budynek”

Źródło: <http://www.inhabitat.com/wp-content/uploads/egg4.jpg>, dostęp grudzień 2011

Inteligencję definiuje też *Wielka Encyklopedia PWN*:

Inteligencja to cecha warunkująca sprawność czynności poznawczych, takich jak rozwiązywanie problemów; od inteligencji zależy sprawne korzystanie z nabytej wiedzy, a także skuteczne zachowanie się wobec nowych sytuacji i zadań.

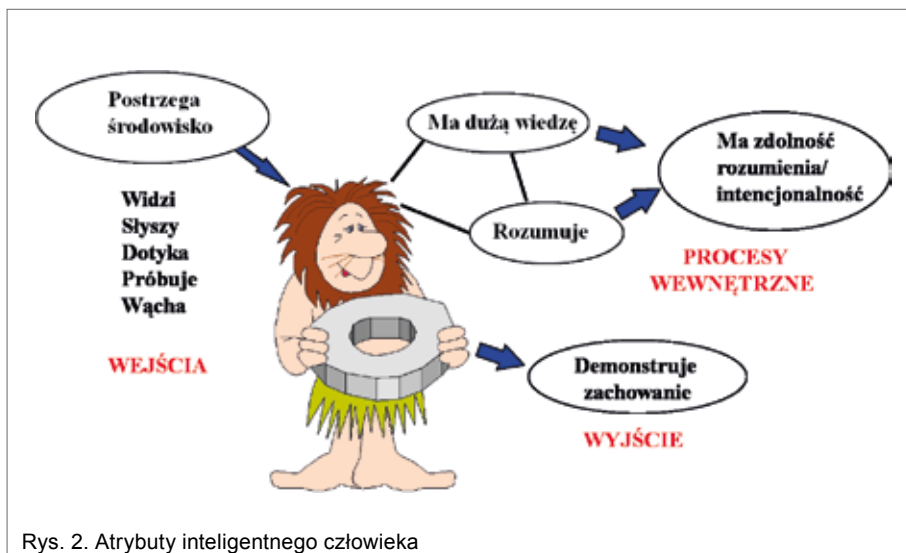
Wszystkie te definicje odwołują się do takich działań i takich przejawów tych działań inteligentnego człowieka, które mogą być także odnalezione w funkcjonowaniu odpowiednio zbudowanych systemów technicznych, w szczególności budynków. Porównajmy rysunek 2, przedstawiający przejawy inteligentnego działania człowieka z rysunkiem 3, na którym w podobnej konwencji przedstawiono wybrane aspekty funkcjonowania nowoczesnie wyposażonego budynku.

Widać, że w pewnych obszarach analogie są bardzo głębokie. Drastyczne różnice pojawiają się wtedy, gdy zaczynamy mówić o wyższych czynnościach psychicznych, o wiedzy, rozumowaniu oraz intencjonalności. Jednak znaczna część zachowań inteligentnego człowieka może być także odnaleziona w funkcjonowaniu inteligentnego budynku!

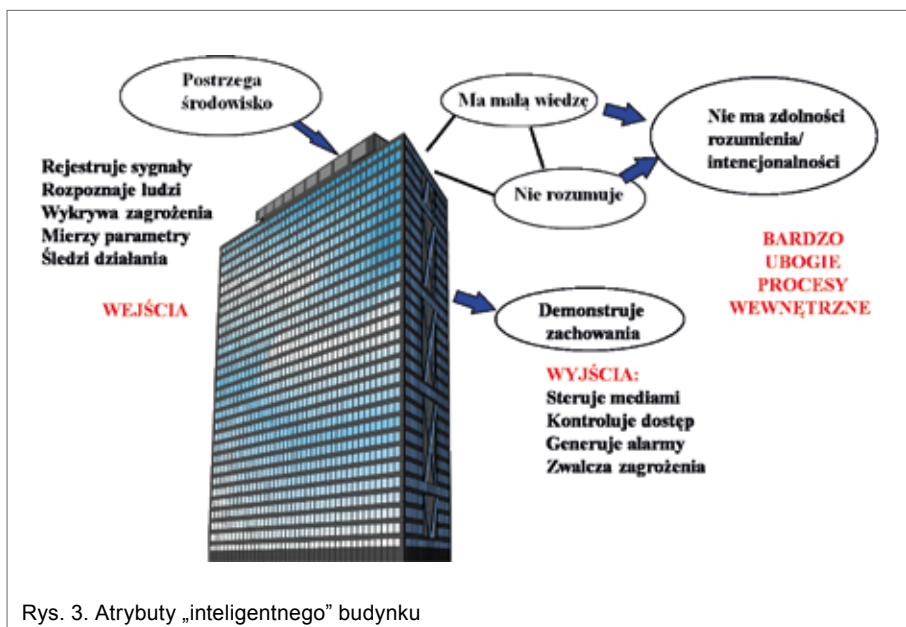
Spróbujemy w tym artykule pokazać, jakie elementy sztucznej inteligencji mogą znaleźć zastosowanie w „inteligentnych” budynkach i co można z ich pomocą osiągnąć.

Pozyskiwanie i inteligentne wykorzystanie informacji z czujników

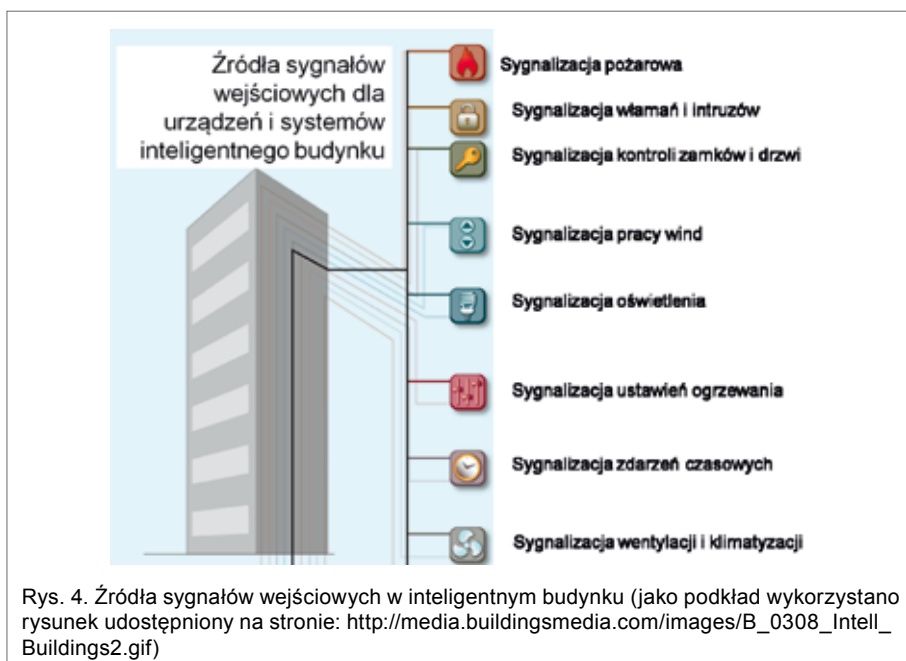
Zacniemy od lewej strony rysunku 3, pokazując, co można udoskonalić dzięki zastosowaniu metod sztucznej inteligencji do procesu pozyskiwania informacji przez systemy wchodzące w skład inteli-



Rys. 2. Atrybuty inteligentnego człowieka



Rys. 3. Atrybuty „inteligentnego” budynku



Rys. 4. Źródła sygnałów wejściowych w inteligentnym budynku (jako podkład wykorzystano rysunek udostępniony na stronie: http://media.buildingsmedia.com/images/B_0308_Intell_Buildings2.gif)

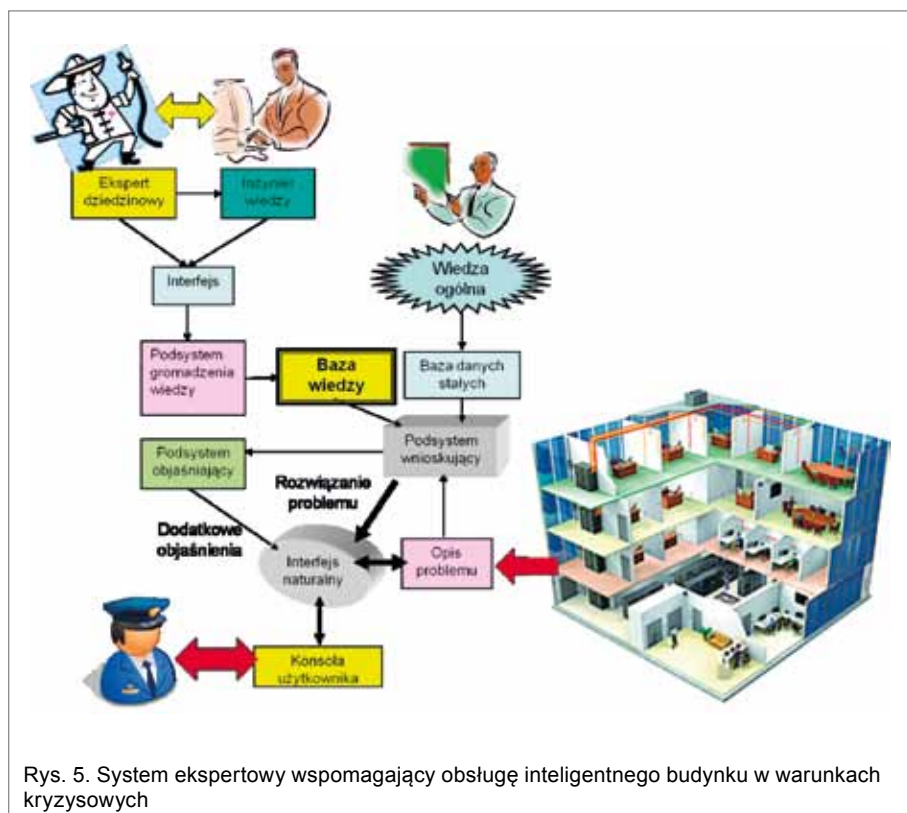
gentnego budynku. Jest wiele systemów sensorycznych, które mogą być wykorzystane w tym kontekście. Odpowiednie czujniki i przetworniki pomiarowe, wykrywające obecność ludzi, kontrolujące parametry fizyczne i chemiczne wewnątrz i na zewnątrz budynku, nadzorujące zużycie mediów, wykrywające zagrożenia (na przykład pożarowe), a także mierzące lub wykrywające mnóstwo innych parametrów mogących mieć znaczenie dla użytkowników inteligentnego budynku lub dla osób nim zarządzających. Czujniki te i przetworniki pomiarowe są obecnie tanie i doskonałej jakości, więc się ich kupuje i instaluje ogromne ilości, tworząc duży strumień informacji, z którymi system informatyczny inteligentnego budynku musi sobie poradzić (rys. 4).

Mimo dużej liczby i sporej różnorodności tych źródeł informacji – samo gromadzenie, rejestrowanie oraz interpretowanie dostarczanych przez nie informacji nie wymaga szczególnej inteligencji. Również typowe wykorzystanie wskazanych sygnałów jakiejś nadmiernej inteligencji nie wymaga, polega bowiem na realizacji zadań regulacji automatycznej w strukturze lokalnych albo globalnych sprzężeń zwrotnych.

Niekiedy (zwłaszcza w sytuacjach nietypowych, takich jak pożar, awaria, włamanie, atak terrorystyczny) obsługa budynku potrzebuje merytorycznego wsparcia ze strony struktur i systemów informatycznych, w jakie budynek jest wyposażony. Pojawia się wtedy możliwość i celowość skorzystania z wypróbowanego w podobnych kontekstach narzędzia sztucznej inteligencji, jakim jest system ekspertowy (rys. 5). System taki, jak wiadomo, wyposażony jest w bazę wiedzy, pozyskaną od ludzi będących ekspertami z danej dziedziny (strażaków, policjantów, specjalistów zarządzania kryzysowego), a także wyposażony jest w moduł automatycznego wnioskowania, który na podstawie wprowadzonej do systemu wiedzy oraz na podstawie danych gromadzonych ze wspomnianych wyżej systemów sensorycznych – może dostarczać personelowi budynku rad pozwalających opanować problem, a zwłaszcza zapewnić bezpieczeństwo znajdującym się w budynku ludziom.

Inteligentna obsługa informacji wizyjnych

Dzięki postępowi, jaki dokonał się ostatnio w technologii różnego rodzaju



Rys. 5. System ekspertowy wspomagający obsługę inteligentnego budynku w warunkach kryzysowych

kamer (rys. 6), łatwe stało się także zbieranie informacji w postaci obrazów statycznych czy rejestracji wideo. Zgromadzenie i przetransmitowanie do centrum kontroli obrazów z bardzo wielu punktów nie nastręcza dziś żadnej trudności, bowiem dostępne i bardzo sprawne kamery są obecnie tanie. Kamery te umożliwiają również obserwację w nocy. Doszło do tego, że projektanci systemów bezpieczeństwa dążą dziś do umieszczania kamer w dowolnych właściwie miejscach inteligentnego budynku – i mogą to robić bez znaczącego zwiększania kosztów.

Zainstalowanie różnych kamer w inteligentnym budynku to jednak tylko połowa pracy. Druga połowa wiąże się z wykorzystaniem informacji dostarczanych przez cały ten teleinformatyczny sprzęt. Tradycyjnie stosuje się tu wyszkolonych strażników, którzy na swoich monitorach (rys. 7) powinni obserwować i analizować to wszystko, co rejestrują rozmieszczone w budynku kamery.

Jest to jednak możliwość potencjalna, bowiem przy dużej liczbie punktów obserwacyjnych znika wprawdzie kwestia niedostępności informacji o tym, co się dzieje w takim lub innym fragmencie monitorowanego obszaru, jednak istotnym problemem staje się równoczesna obserwacja obrazów z wielu kamer. Jeden obserwator nie może ogarnąć wzro-



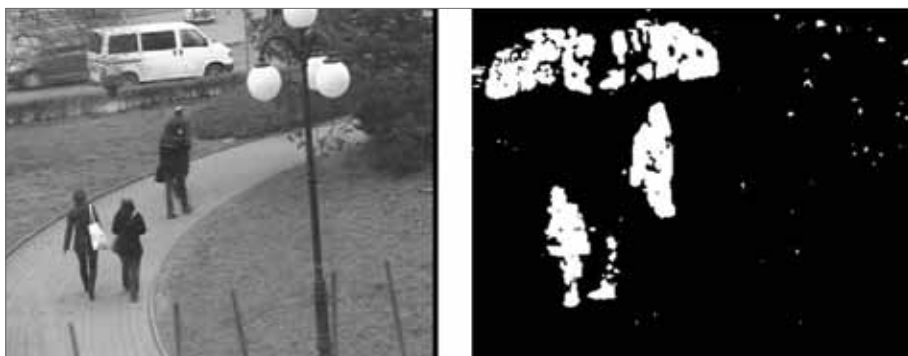
Rys. 6. Kamera przeznaczona do obserwacji w inteligentnym budynku

Źródło: http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/ptz-video-surveillance-camera-316388.jpg, dostęp styczeń 2012

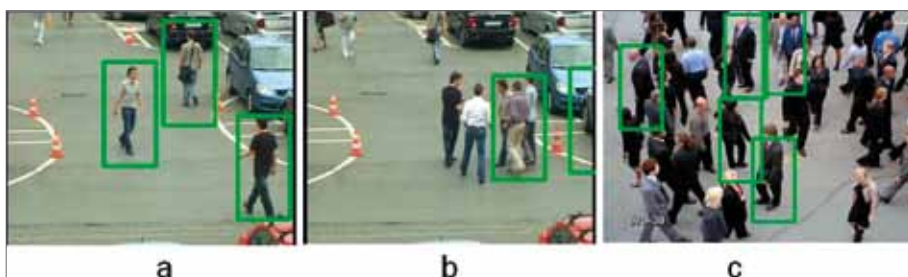


Rys. 7. Typowy przykład centrum kontroli wizualnej obrazów z wielu kamer

Źródło: <http://www.judgerc.org/images/monitoring2.jpg>, dostęp styczeń 2012



Rys. 8. Przykład najprostszej inteligentnej analizy obrazu pochodzącego z kamery inteligentnego budynku – wydzielanie ruchomych obiektów metodą przepływu optycznego



Rys. 9. Ilustracja zróżnicowanego stopnia trudności wydzielania sylwetek ludzkich w różnych sytuacjach

kiem więcej niż kilka do kilkunastu obrazów, a dzielenie strumienia informacji wizyjnej na fragmenty przypisane do różnych obserwatorów obniża skuteczność wykrywania zagrożeń, wynikającą z możliwości obserwowania podejrzanego zachowania intruza przemieszczającego się pomiędzy sektorami obserwacji.

Realne zagrożenie terroryzmem wymaga poprawy zabezpieczenia ważnych obiektów. Może być to realizowane przez wzrost liczby zatrudnionych pracowników ochrony lub poprawę efektywności ich pracy. Praca ta jest odpowiedzialna, trudna i niewdzięczna. Istota problemu polega na tym, że z jednej strony świadomość konsekwencji przeoczenia ważnej informacji o zagrożeniu zmusza do skupienia uwagi i natężonego wysiłku przy obserwacji obrazów z kamer (co wywołuje stres), a z drugiej strony brak jakichkolwiek zagrożeń (przez całe godziny, dni i miesiące!) jest normą we wszystkich systemach kontroli bezpieczeństwa. W sytuacji długotrwałego obserwowania scen, które nie zawierają żadnych podejrzanych treści, u osób pełniących funkcje obserwatorów dochodzi do zjawiska psychologicznego zwanego deprywacją (długotrwały brak istotnych bodźców aferentnych) – co radykalnie obniża ich czujność i stwarza wielkie prawdopodobieństwo braku właściwej reakcji w momencie, kiedy pojawi się realne zagrożenie.

Tę trudną, odpowiedzialną i stresującą pracę osób odpowiedzialnych za bezpieczeństwo obiektów szczególnie chronionych trzeba więc wspomagać odpowiednią techniką.

Konieczne jest więc komputerowe wspomaganie analizy i oceny rejestrowanych sygnałów i obrazów. Ponieważ niepodobna z góry przewidzieć wszystkich sytuacji, jakie mogą się zdarzyć w obserwowanym obiekcie, dlatego konieczne jest zastosowanie sztucznej inteligencji. Jej zastosowanie jest konieczne dla odróżniania sytuacji, które wynikają z normalnej zmienności scen i rejestrowanych obrazów, od sytuacji wymagających interwencji obsługi lub nawet wezwania pomocy z zewnątrz (policji, straży pożarnej, ratowników medycznych itp.).

Automatyczna obserwacja działań ludzi i ruchu pojazdów

Zadania, jakie taki musi rozwiązywać system automatycznej analizy danych obrazowych, mogą być bardzo różne. Pierwszym i podstawowym zadaniem, jakie się tu pojawia, związane jest z koniecznością automatycznego wykrywania obiektów, które powinny być przedmiotem analizy. Najczęściej interesują nas ludzie widoczni w obserwowanej przestrzeni i ich działania, a także pojazdy i inne podejrzane obiekty. Realizuje

się to metodą wykrywania na obrazie, które z widocznych obiektów się poruszają, a które są nieruchome, więc zapewne stanowią nieszkodliwe elementy tła. Na rysunku 8 przedstawiono takie wykrywanie ruchomych obiektów za pomocą techniki sztucznej inteligencji nazywanej metodą przepływu optycznego.

Metoda przepływu optycznego jest wygodna, ale mylnie identyfikuje niekiedy zawartość obrazu – np. uznaje odsłonięty przez poruszającego się człowieka fragment tła za obiekt, który przemieszcza się w kierunku przeciwnym do faktycznego kierunku ruchu. Na kolejnych obrazach błąd taki zwykle jest korygowany (obiekt znika), ale w innym miejscu może dojść do niepoprawnej klasyfikacji. Nie ulega zatem wątpliwości, że obok wykrycia ruchu trzeba upewnić się, że ruchomy obiekt jest właśnie tym, co zamierzamy obserwować. Trzeba więc wyodrębnić ten obiekt i ocenić (automatycznie!), czy ma on cechy ludzkiej sylwetki.

Stopień trudności zadania wydzielenia sylwetek ludzkich (jako obiektów, które potem powinny być szczegółowo śledzone) może być bardzo zróżnicowany. Czym innym jest wydzielenie sylwetek ludzi chodzących pojedynczo (rys. 9 a), inny jest stopień trudności rozróżnienia poszczególnych osób w grupie (rys. 9 b), a nieporównanie większy jest poziom trudności wyodrębniania pojedynczych osób w tłumie (rys. 9 c). O ile zbudowanie algorytmu komputerowego dla przypadku śledzenia pojedynczych indywiduów (rys. 9 a) jest stosunkowo łatwe, o tyle takie samo zadanie w przypadkach pokazanych na dalszych rysunkach nastręcza naprawdę poważnych trudności.

Tym niemniej w prostych przypadkach śledzenie przy pomocy komputera zachowania pojedynczego człowieka, całkowicie wyizolowanego z tła i analizowanego jako pojedynczy obraz – jest całkowicie możliwe (rys. 10).

Automatyczne wykrywanie intruzów i podejrzanych przedmiotów

Zadania wizualnego nadzoru nad fragmentami inteligentnego budynku najczęściej wiążą się z wykrywaniem intruzów (zwykłych złodziei lub terrorystów) w miejscach, w których ich być nie powinno, a także z wykrywaniem przedmiotów, które długo pozostają na jakimś miejscu bez opieki (potencjalna bomba) lub przedmiotów, które były i zniknęły (kradzież obrazu lub innego przedmiotu).

Niestety warunki oświetlenia wnętrz nowoczesnych budowli (a takimi są z reguły inteligentne budynki) są takie, że obraz ewentualnie pojawiającego się tam intruza lub podrzuconego przedmiotu niknie wśród odbłasków światła od szklanych i błyszczących powierzchni. Konieczna jest wtedy inteligentna obróbka obrazu wykonywana metodą znajdowania różnic pomiędzy obrazem, na którym system podejrzewa obecność intruza, a obrazem tła, kiedy wiadomo, że intruza nie ma. Wyniki takiej inteligentnej obróbki obrazu pokazano na rysunku 11.

Wprawny pracownik ochrony, oglądając obraz na rysunku 11, a nie miałby wątpliwości, że dzieje się coś podejrzanego. Jednak żeby zapewnić możliwość automatycznej oceny tej sytuacji przez komputer i ewentualnego wygenerowania sygnału alarmu, trzeba posłużyć się procedurą formalną. W tym celu przywołuje się obraz pokazany na rysunku 11 b, który przedstawia zapamiętany wygląd tego samego obszaru budynku z całą pewnością bez niczego podejrzanego (tak zwany obraz tła). Numeryczne odjęcie tych dwóch obrazów od siebie pozwala odkryć na obrazie wynikowym (rys. 11 c) sylwetkę włamywacza (i jego cień, którego także na obrazie tła nie ma), następnie podrzucony przedmiot (teczka po lewej stronie na ławce) oraz uchylone drzwi, przez które intruz wtargnął do strzeżonego obszaru. Obraz różnicowy jest zbinaryzowany, to znaczy piksele na tym obrazie mają tylko wartość 0, jeśli w danym punkcie analizowany obraz nie różni się od obrazu tła (co przedstawiane jest jako czarny punkt), albo wartość 1, gdy wykryto różnicę pomiędzy obrazem analizowanym a obrazem tła, przy czym nieważne jest, czy różnica polega na tym, że obraz analizowany jest jaśniejszy czy ciemniejszy od tła – istotne jest, że się różni. Takie punkty, gdzie dostrzeżono zmianę, zaznaczane są na obrazie wynikowym jako punkty białe. Wynik taki widoczny jest na rysunku 11 c.

Opisana wyżej (oczywiście opisana w uproszczeniu, bo pominięto cały szereg istotnych szczegółów) metoda wykrywania intruzów lub pojawiających się (bądź znikających) przedmiotów ma jedną podstawową wadę: żeby wykryć, że coś jest nie w porządku, trzeba mieć do dyspozycji porównawczy obraz tła (rys. 11 b). W sytuacji, jaka przedstawiona jest na rysunku 11, sprawa jest prosta i raczej oczywista: wystarczy zarejestrować ob-



Rys. 10. Przykład automatycznego wyróżniania na obrazie pojedynczej sylwetki ludzkiej



Rys. 11. Przykład automatycznego wykrywania intruza i podłożonej bomby

raz korytarza w momencie, kiedy nie ma na nim żadnych osób ani żadnych nieprzewidzianych przedmiotów – i sprawa jest załatwiona.

Niestety bywa tak, że nadzorować trzeba obszar, w którym ustawicznie kręcą się ludzie (a w przypadku zewnątrz budynku – także jeżdżą pojazdy) i w dodatku w obszarze tym obraz tła ulega ciągłym (choć z reguły powolnym) zmianom. Źródłem tych zmian jest głównie zmienne oświetlenie. Zarówno obszary na zewnątrz budynku, jak i przestrzenie w jego wnętrzu oświetlone naturalnym światłem słonecznym – zmieniają swój wygląd zależnie od pory dnia i pory roku. Dodatkowo pewne elementy wyposażenia (na przykład ławki dla interesantów) mogą być dostawiane albo zabierane, niektóre źródła sztucznego oświetlenia mogą być włączane lub wyłączane – słowem, można się liczyć z koniecznością ciągłej aktualizacji tego, co można traktować jako obraz tła (odpowiednik rysunku 11 b).

Jak taką aktualizację robić na bieżąco, nie zakłócając normalnego funkcjonowania budynku i jego otoczenia? Innymi słowy – jak zobaczyć określoną przestrzeń bez ludzi, w sytuacji, gdy ustawicznie kręci się tak mnóstwo ludzi?

Otóż można zastosować metodę uśredniania obrazów. Generacja tła oparta jest o algorytm średniej bieżącej, który opisany jest wzorem:

$$\mu_t = \alpha I_t + (1 - \alpha) \cdot \mu_{t-1}$$

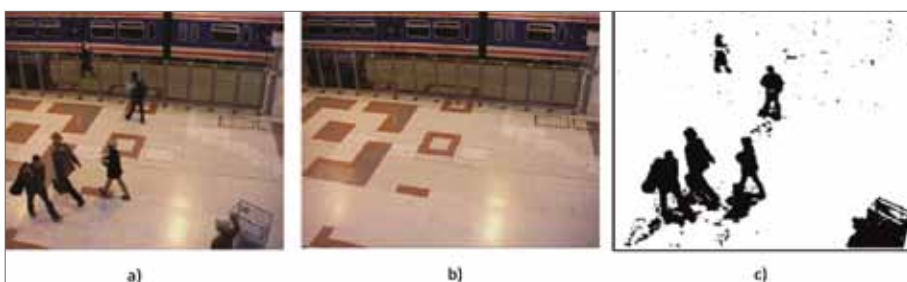
gdzie

- I_t – aktualna wartość piksela;
- μ_{t-1} – poprzednia wartość średniej dla tego piksela (poprzedni model tła);
- μ_t – nowa wartość średniej (nowy model tła);
- α – empirycznie dobierany współczynnik z przedziału (0; 1) – stanowi kompromis pomiędzy stabilnością a szybkim uzupełnianiem tła. Wynik takiego działania pokazano na rysunku 12.

Po lewej stronie widoczna jest aktualna (bieżąca) klatka, a po prawej tło wygenerowane na podstawie uśredniania obrazu z sekwencji klatek (od pierwszej do aktualnej). Tło stworzone po pierwszej klatce jest oczywiście identyczne jak zawartość tej klatki, ale różnice między obrazem aktualnym i rekonstruowanym obrazem tła uwypuklają się w miarę wprowadzania do analizy coraz większej liczby klatek. Można zauważyć, że już po ok. 100–150 klatkach tło nie zawierało



Rys. 12. Rezultaty generacji tła metodą uśredniania obrazów z wielu klatek. Po lewej pokazana jest aktualna klatka, po prawej rekonstruowane obliczeniowo tło. Wyniki przedstawiono dla klatek o numerach 1, 50, 100, 150 i 800



Rys. 13. Przykład automatycznego wykrywania pojawiających się osób i przedmiotów

małych obiektów ruchomych (ludzi), problemem było jednak nadal zakłócenie w górnej części tła spowodowane pojawieniem się w tym miejscu dużego obiektu (autobusu), który dodatkowo zatrzymał się na kilkanaście sekund. Usunięcie tego zakłócenia wymagało zgromadzenia informacji o rzeczywistym tle w miejscu zasłoniętym przez autobus, a to wiązało się z koniecznością obserwowania sceny przez następne kilkanaście/kilkadziesiąt sekund. W efekcie dopiero od klatki nr 800 i następnych możliwe było uzyskanie pełnego, pozbawionego wszelkich zakłóceń tła.

Mając dobrze zdefiniowany obraz tła, można natychmiast wykryć obecność nowych ludzi i przedmiotów umieszczonych w nadzorowanej przestrzeni (rys. 13), co może znacząco wspomagać pracę funkcjonariuszy służb ochrony inteligentnego budynku.

Dość istotnym problemem przy automatycznej identyfikacji i lokalizacji sylwetek ludzkich są cienie rzucane przez obserwowane osoby. Cienie takie mogą być błędnie identyfikowane jako dodatkowe sylwetki, co może prowadzić do błędnej interpretacji zawartości sceny i do generacji fałszywych alarmów.

Odróżnienie cienia idącej osoby od zarysu właściwej sylwetki jest oczywiste i natychmiastowe dla człowieka oglądającego kadr i oceniającego jego zawartość. Niestety to samo zadanie postawione przed systemem komputerowym – mającym analizować i oceniać rejestrowane obrazy w sposób automatyczny – okazuje się bardzo trudne. W literaturze przedmiotu znaleźć można opisy wielu metod przeznaczonych do tego zadania, poczynając od metod prostych, opartych na analizie jasności poszczególnych pikseli obrazu, poprzez próby stosowania metod opartych na ocenie koloru aż do metod opartych na analizie tekstury fragmentów obrazu w obszarze zaliczanym do tła, w obszarze zaliczanym do sylwetki osoby idącej oraz w obszarze, który jest obszarem domniemanego cienia. Nie ma tu miejsca, żeby te wszystkie metody w jakikolwiek sposób próbować scharakteryzować, ale może tytułem przykładu przytoczymy jeden ze wzorów używanych do tego celu, a mianowicie znormalizowaną różnicę gradientów (ang. *normalized gradient difference* NGD):

$$R(i, j) = 1 - \frac{\sum_{(n, m)} 2 \cdot \|\nabla I(n, m)\| \cdot \|\nabla B(n, m)\| \cdot \cos(\theta)_{(n, m)}}{\sum_{(n, m)} (\|\nabla I(n, m)\|^2 + \|\nabla B(n, m)\|^2)}$$

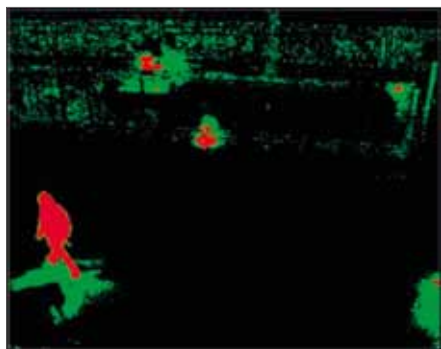
gdzie

- (n, m) – otoczenie piksela (i, j) ;
- ∇I – gradient sceny;
- ∇B – gradient modelu tła;
- θ – kąt pomiędzy ∇I a ∇B .

Stosując tę (i wiele innych metod), udaje się w wielu przypadkach dość skutecznie odróżnić rzeczywiste obiekty (idących ludzi) od ich cieni (rys. 14), chociaż pomyłki się także zdarzają.

Śledzenie ruchu ludzi

W systemie ochrony inteligentnego budynku rzadko zależy nam jedynie na tym, żeby wykryć samą tylko obecność



Rys. 14. Przykładowa mapa kandydatów na cień. Kolor zielony – obszary, które stanowią potencjalny cień, kolor czerwony – obszary za ciemne, aby zostać uznane za cień

ludzi. Najważniejsze jest, co ci ludzie robią, dlatego, że ewentualne zagrożenia mogą się właśnie pojawić w następstwie działań ludzi, które siłą rzeczy muszą być przedmiotem analizy i prób automatycznej klasyfikacji (ze szczególnym uwzględnieniem klas zachowań znamionujących czyny przestępcze – kradzież, wandalizm, terroryzm itp.). Pozornie wydaje się, że po opanowaniu czynności wykrywania sylwetek ludzi na poszczególnych klatkach filmu wideo, obrazującego obecność i działania ludzi w chronionym obszarze – sprawa śledzenia ich ruchu powinna być prosta i łatwa do rozwiązania. Można sądzić, że wystarczy śledzić położenie tej samej sylwetki na kolejnych ujęciach z kamery – a trajektoria ruchu będzie prostą konsekwencją tego wykrywania (rys. 15).

W rzeczywistości sprawa nie jest taka prosta. Można się o tym przekonać, oglądając sekwencję obrazów na rysunku 16. Na skutek tego, że w polu widzenia były dwie sylwetki (zaledwie dwie!), algorytm śledzenia związany początkowo z jedną z tych sylwetek (co zaznaczono gwiazdką) w chwili mijania się obserwowanych ludzi „przeskoczył” na drugą sylwetkę, co spowodowało, że śledzenie ich zachowania prowadziło do błędnych wniosków (można było sądzić, że śledzona osoba nagle zawróciła i poszła w przeciwnym kierunku – co na przykład mogło stać się powodem alarmu poprzez domniemanie, że obserwowana osoba ucieka).

Przykład pokazany na rysunku 16 wskazuje, że zadanie automatycznego śledzenia sylwetek ludzi jest dosyć skomplikowane i istniejące algorytmy nie radzą sobie z nim tak całkiem bezbłędnie.

Mimo trudności pokazanych (przykładowo) na rysunku 16 śledzenie ruchu ludzi przez automatyczny system kompu-



Rys. 15. W prostej scenie z jedną sylwetką ludzką śledzenie jej ruchów jest raczej proste



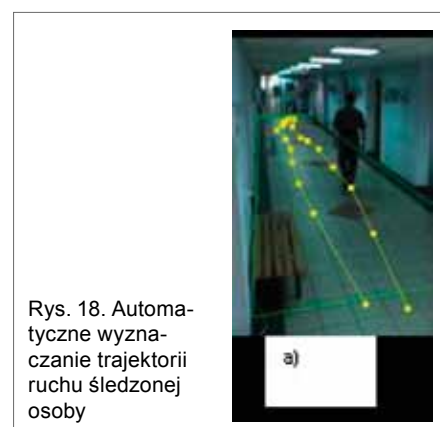
Rys. 16. Przykład błędu powstającego podczas automatycznego śledzenia ruchu ludzi



Rys. 17. Przykład bezbłędnego równoczesnego śledzenia automatycznego wielu osób

terowy może być bardzo skuteczne, co pokazuje przykładowa seria obrazów na rysunku 17.

Na rysunku tym widać, że system komputerowy prawidłowo wykrył wszystkie znajdujące się w polu widzenia osoby i śledził je skutecznie na kolejnych klatkach, chociaż osoby te zbliżały się do siebie, mijaly, chwilami nawet przesłaniały itp. Taki system może naprawdę sprawować skuteczny nadzór nad określonym obszarem inteligentnego budynku. W wyniku śledzenia



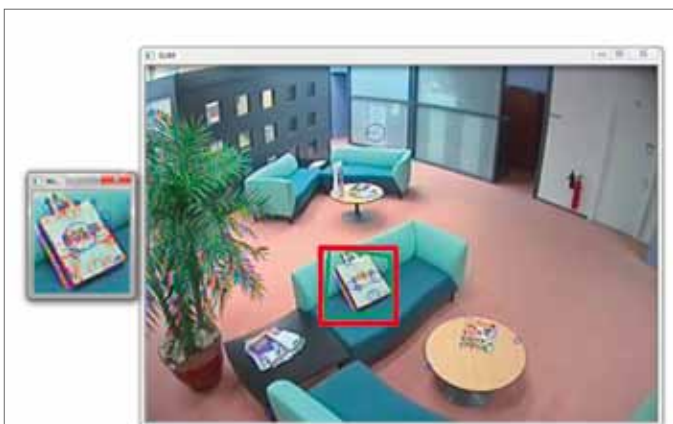
Rys. 18. Automatyczne wyznaczanie trajektorii ruchu śledzonej osoby



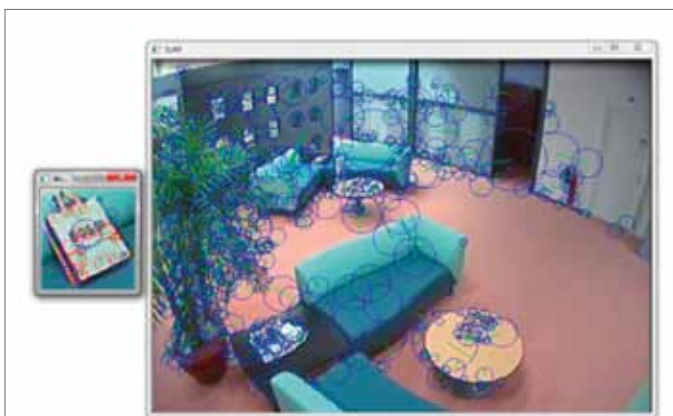
Rys. 19. Wykrycie niedozwolonego zachowania śledzonej osoby (opis w tekście)



Rys. 20. Automatyczne wykrycie i zapamiętanie potencjalnie niebezpiecznego przedmiotu



Rys. 21. Wykrycie niebezpiecznego przedmiotu na zasadzie odnalezienia jego wzorca



Rys. 22. Poszukiwanie cech obecności niebezpiecznego przedmiotu w nadzorowanym pomieszczeniu

ruchu osób można rekonstruować trajektorie ich ruchu (rys. 18), porównując je ze wzorcami trajektorii dozwolonych i niedozwolonych.

Co więcej – śledząc ruchy ludzi, system automatycznie może wykryć ich inne niedopuszczalne zachowania. Na przykład na rysunku 19 pokazano moment automatycznego wykrycia na sekwencji obrazów momentu, kiedy śledzona osoba bez zatrzymywania się podrzuciła w mijanej wnęce niewidoczną uprzednio torbę (domyślnie – bombę) oznaczoną na środkowym i prawym zdjęciu symbolem gwiazdki. Aby nie zasłaniać markerów pokazujących automatyczne wykrycie przez system inteligentnego budynku potencjalnie niebezpiecznego ładunku, gwiazdkę tę umieszczono nie na wykrytej torbie – lecz poniżej.

Wykrywanie próby podrzucenia podejrzanego obiektu można usprawnić, jeśli system śledzący może dysponować jego wzorcem. Na rysunku 20 pokazano sytuację, gdy w polu widzenia pojawił się obiekt, który może być potencjalnie niebezpieczny (torba mogąca ukrywać bombę). Obiekt taki zostaje zaznaczony zieloną ramką, a jego wygląd zostaje zapamiętany w pamięci roboczej urządzenia – vide: lewa strona rysunku. Jakkolwiek sytuacja na tym obrazie nie wywołuje jeszcze alarmu (torba jest pod opieką właściciela), to dzięki temu, że wiadomo już, czego szukać, system czegoś istotnego się nauczył.

Jeśli zapamiętany obiekt pojawi się w kontekście sugerującym, że mógł zostać podrzucony – zostanie wygenerowany sygnał alarmu (rys. 21).

Dzięki temu, że system po każdej takiej przygodzie zapamiętuje wzorzec potencjalnie niebezpiecznego przedmiotu – jego czujność ustawicznie wzrasta. Po skutecznym wykryciu zagrożenia (nawet tylko potencjalnego) system, przeszukując nadzorowany obszar, szuka na nim elementów, które składały się na obraz niebezpiecznego przedmiotu (niebieskie koła) w tym celu, żeby wykryć taki sam przedmiot także wtedy, gdy będzie on niecałkowicie widoczny (rys. 22).

Inteligentna analiza strumieni wideo

W poprzednich rozdziałach niniejszej pracy omawiane były czynności, jakie system inteligentnego budynku powinien wykonywać na obrazach nadsyłanych z kamer śledzących wybrane obszary budynku i obserwujących pojawiające się obiekty (głównie ludzi) oraz ich zachowania. Istotnym składnikiem tego procesu automatycznej obserwacji, mającego za zadanie automatyczne wspomaganie obserwacji prowadzonych przez pracowników ochrony, jest czynnik czasu. W związku z tym – jakkolwiek w poprzednich rozdziałach przedstawiano głównie statyczne obrazy i ich analizę (bo to się daje w miarę wygodnie zaprezentować w druku) – uwaga twórców systemów automatycznego monitoringu ukierunkowana być musi na obróbkę wizyjnych informacji dynamicznych, czyli na inteligentną analizę strumieni wideo. Jeden z możliwych schematów działania takiego algorytmu inteligentnej analizy strumieni wideo przedstawiono na rysunku 23. Jest to oczywiście jedna z wielu możliwości komputerowego rozwiązania rozważanego tu problemu, mająca jedynie zasygnalizować, jakie przykładowe etapy analizy strumienia wideo mogą wchodzić w skład takiej inteligentnej obróbki, ale dla celów poglądowych ten schemat bardzo dobrze się nadaje.

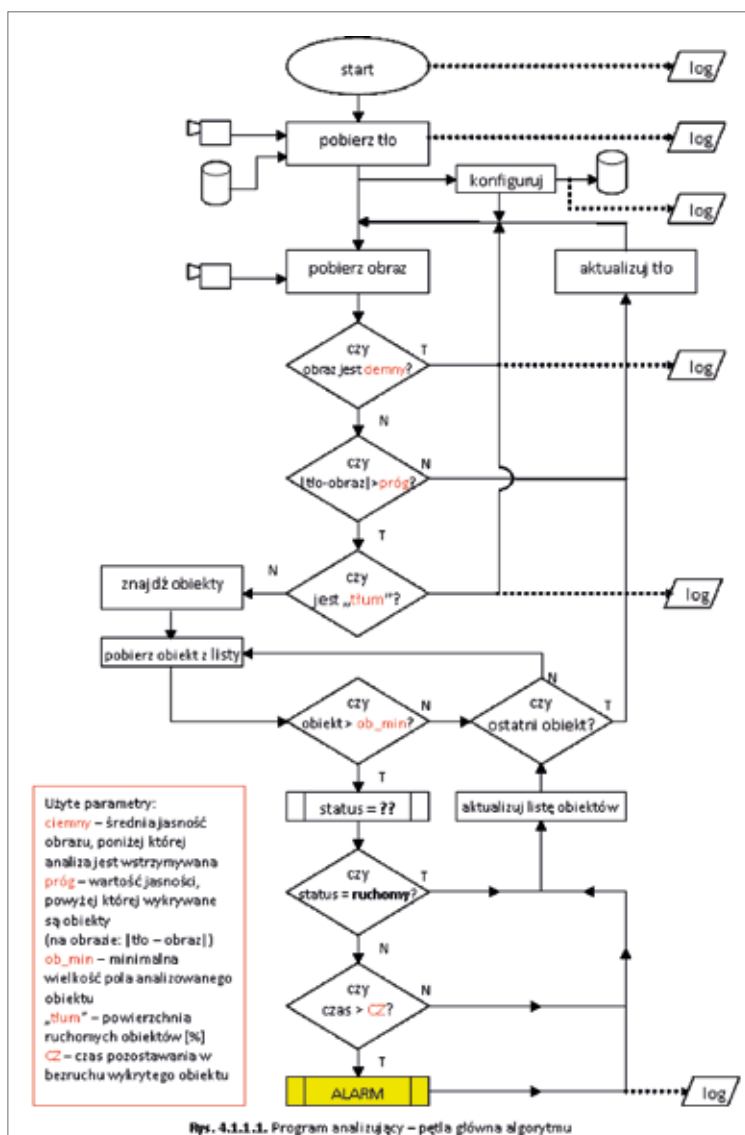
Wymienione wyżej zagadnienia nie wyczerpują oczywiście listy zadań, jakie musi pełnić system analizy sygnałów w inteligentnym budynku. Trzeba bowiem także automatycznie wy-

krywać i identyfikować próby sabotażu (przesłonięcia kamery, skierowania jej w inną stronę, zastąpienia bieżącego sygnału pokazującego aktualną sytuację sygnałem wideo odtwarzającym „w kółko” ten sam obraz, na przykład pustego korytarza, podczas gdy w rzeczywistości na korytarzu tym są rabusie lub terroryści itp.). Zmusza to do budowy systemów opartych na analizie semantycznej.

Analiza semantyczna jako element zaawansowanych systemów monitoringu

Budując system analizy obrazów i sekwencji wideo dla inteligentnego budynku, trzeba wziąć pod uwagę następujący fakt: Żeby wykryć a następnie unicestwić zagrożenie, potrzeba dwóch rzeczy. Po pierwsze, trzeba dysponować środkami potrzebnymi do tego, żeby zarejestrować symptomy zagrożenia. Temu celowi służą opisane w innych częściach tego artykułu systemy rejestracji oraz przetwarzania i analizy różnych sygnałów, obrazów i innych danych. Jest to warunek konieczny (brak stosownych czujników, kamer i innych odbiorników informacji byłby równoznaczny ze ślepotą, a brak automatycznej analizy sygnałów z tych systemów obserwacji byłby równoznaczny z roztrągnięciem), ale jest to warunek niewystarczający. Doświadczenie uczy bowiem, że nawet najbogatsze nagromadzenie danych z wszystkich tych czujników i przetworników pomiarowych, kamer i systemów rozpoznawania obrazów – nie wystarcza. Nie wystarcza także najdokładniejsza nawet analiza pozyskanych tym sposobem danych, ponieważ symptomy zagrożenia na obrazach z kamer naprawdę śledzących określony obszar czy fragment budynku nie są tak zwykłe tak oczywiste i tak widoczne, jak pokazane na wcześniej dyskutowanych obrazach, specjalnie zaaranżowanych do celów badawczych. Dlatego (poza trywialnymi przypadkami) nie da się sygnału ostrzegającego przed zagrożeniem – na przykład terrorystycznym – uzyskać drogą nawet najbardziej wyrafinowanych filtracji czy analiz danych pochodzących z czujników i przetworników, bo w ogólnym przypadku nie wiadomo, co podczas filtracji wydobywać, a co odrzucać, podobnie jak nie wiadomo, na czym skupić uwagę podczas analizy, a co ignorować.

Posłużmy się przykładem: Załóżmy, że system wizyjny potrafi już wykrywać i lokalizować sylwetki ludzkie. Robiąc to, posługujemy się analizą obrazu poprzedzoną (jeśli trzeba) jego filtracją. Do tego miejsca zadania systemu monitoringu nie różnią się istotnie od zadań innych systemów typu *computer vision*. Ciąg dalszy jest jednak zadaniowo specyficzny. Informacją, która powinna wywołać alarm lub przynajmniej zwrócić uwagę ochrony, może być w jednych przypadkach pojawienie się ludzkiej sylwetki tam, gdzie nikogo nie powinno być – albo jej brak w miejscu, gdzie obecność człowieka (na przykład strażnika) jest wymagana. Bywają przypadki, gdy niepokojący jest fakt, że człowiek szybko się porusza (być może ucieka?), ale łatwo sobie wyobrazić sytuację, gdy zaniepokojenie budzić powinien fakt, że zauważony człowiek zatrzymał się lub porusza się wyjątkowo wolno. Może się zdarzyć, że powodem do alarmu będzie fakt, że człowiek usiadł – lub przeciwnie: że stoi chociaż należało usiąść. Przykłady można mnożyć, nie o to jednak chodzi.



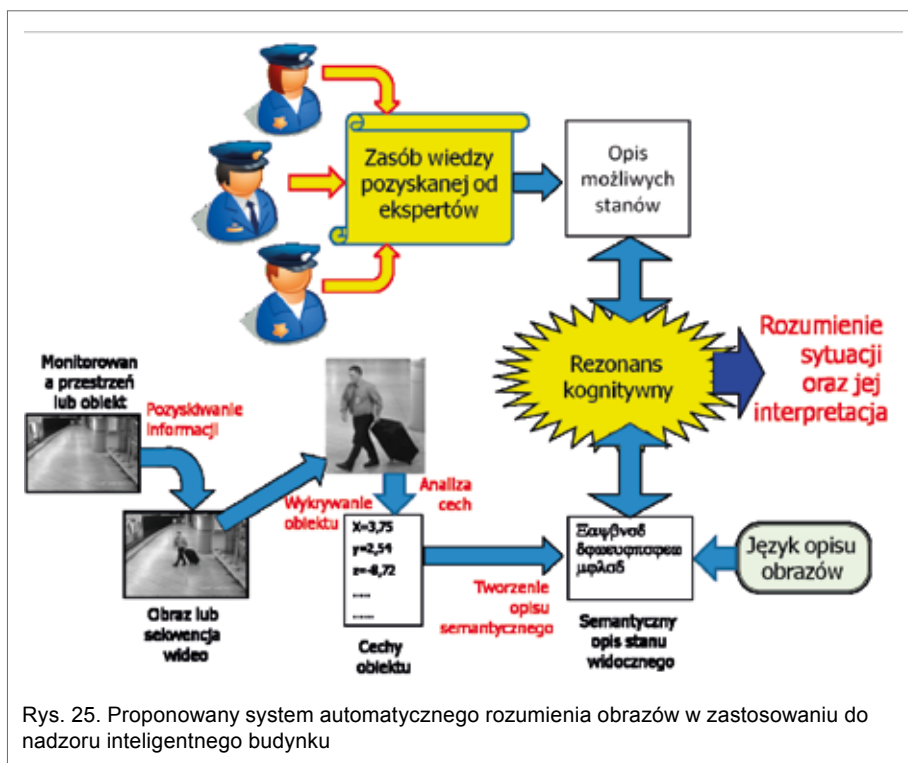
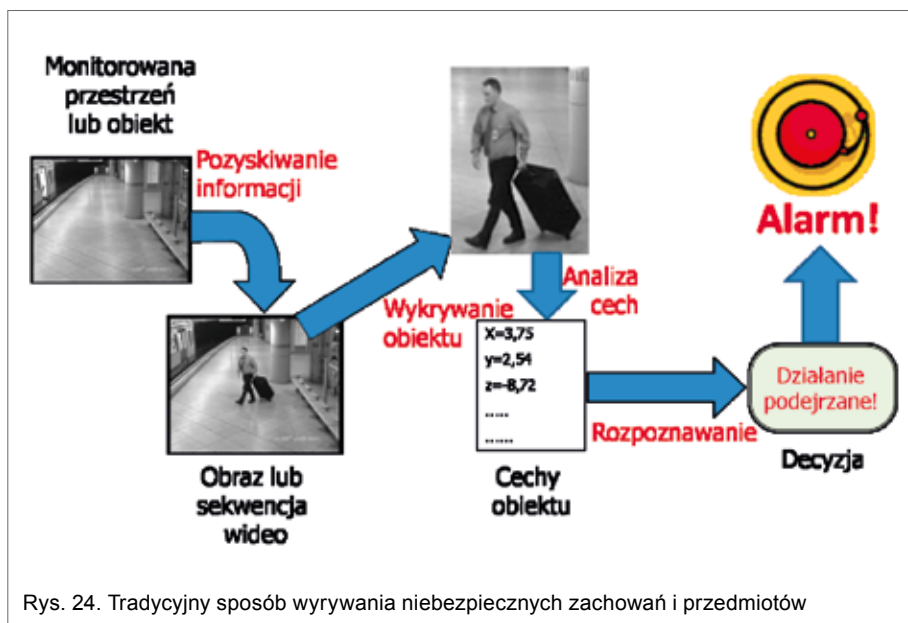
Rys. 4.1.1.1. Program analizujący – pętla główna algorytmu

Rys. 23. Przykładowy schemat procesu analizy strumienia wideo w systemie inteligentnego budynku

Ważne jest stwierdzenie, że bardzo trudne jest określenie *a priori* ogólnych kryteriów poprawnego lub niepokojącego zachowania obserwowanych ludzi.

Posłużyliśmy się przykładem śledzenia ludzi, bo to zadanie w systemach bezpieczeństwa ma szczególne znaczenie, ale w podobny sposób można wskazać różne warianty powodów do alarmu wywoływanych przez obecność lub brak w polu widzenia określonych przedmiotów. Jeszcze inną sferę powodów do alarmu wywoływać mogą kontakty ludzi z przedmiotami (zabieranie jakichś przedmiotów lub ich pozostawianie) i kontakty ludzi z innymi ludźmi. Ogólnie wiele jest sytuacji, w których wyraźne zdefiniowanie okoliczności budzących zaniepokojenie jest bardzo trudne.

Zadanie staje się jeszcze trudniejsze, gdy niebezpieczeństwo jest następstwem celowych działań ludzi, którzy bardzo inteligentnie starają się ukryć swoje prawdziwe intencje, a swoje działania – w istocie zagrażające nadzorowanym obszarom i obiektom – starają się maksymalnie upodobnić do działań całkowicie nieszkodliwych i rutynowo występujących w danym obszarze lub w nadzorowanym obiekcie.



Naszkicowane rozważania skłaniają do wniosku, że decyzji o tym, czy coś jest „normalne” czy „niepokojące”, nie można w sposób automatyczny wyprowadzić z prostej analizy obrazu (lub sekwencji wideo), nawet połączonej z automatycznym rozpoznawaniem obiektów widocznych na obrazie czy na nagraniu. Żeby rozpoznać symptomy niebezpieczeństwa, trzeba zrozumieć, co robi człowiek, który pojawił się w monitorowanym przez system obszarze czy obiekcie, do czego ten obserwowany człowiek zmierza i jakie są jego rzeczywiste intencje.

Dlatego w najnowszych badaniach dotyczących problematyki inteligentnych budynków rozważa się podejście oparte na koncepcji automatycznego rozumienia, a nie na koncepcji automatycznego rozpoznawania. Takie podejście bywa określane także jako oparte na wiedzy albo semantycznie zorientowane, albo wreszcie określa się je terminem kognitywistyczne, wskazując w ten sposób związek między tym podejściem a przedmiotem badań kognitywistyki jako dziedziny wiedzy o procesach poznawczych i myślowych inteligentnego człowieka.

Koncepcja automatycznego rozumienia obrazów wprowadzona została początkowo dla bardziej inteligentnej automatycznej interpretacji obrazów medycznych. W niniejszej publikacji po raz pierwszy zaproponowane zostało automatyczne rozumienie jako metoda przewidywania wyżej opisanych trudności w zastosowaniu do systemów zabezpieczania obszarów i obiektów specjalnego znaczenia. Szczególna troska musi być przy tym związana z faktem, że procedury automatycznego rozumienia obrazów wymagają dość zaawansowanych i pracochłonnych technik analizy i interpretacji obrazów (lub innych sygnałów), podczas gdy w systemach ochrony inteligentnych budynków konieczne będzie zapewnienie ich działania w ścisłym reżimie czasu rzeczywistego.

Przedstawimy teraz zasadnicze elementy opracowanej koncepcji algorytmów analizy semantycznej sceny obserwowanej przez system nadzoru inteligentnego budynku. Zaczniemy od wskazania, na czym polega odmienność zastosowania analizy semantycznej w stosunku do lepiej znanych oraz szeroko stosowanych systemów wykorzystujących techniki automatycznego rozpoznawania obrazów.

Otóż przy wszystkich tradycyjnych podejściach zakłada się jednokierunkowy przepływ sygnałów – od wejścia, którym może być (założmy to dla ustalenia uwagi) kamera systemu monitorowania jakiegoś obszaru lub obiektu, poprzez kolejne etapy przetwarzania i segmentacji rejestrowanych obrazów (wydobycie obiektów, usuwanie cieni, eliminacja tła itd.) aż do systemów analizy i rozpoznawania, które wydobywają istotne cechy obserwowanych obiektów, klasyfikują je i kategoryzują, powodując (zakładamy, że w uzasadnionych przypadkach) wymagany alarm. Przedstawiono to schematycznie na rysunku 24.

Przy automatycznym rozumieniu obrazu istotne jest to, że mamy dwa źródła i dwa strumienie informacji (rys. 25). Jeden z nich, podobnie jak w systemach tradycyjnych, zaczyna się od sensorów (na przykład kamer) i biegnie przez kolejne etapy przetwarzania, segmentacji i analizy sygnałów, kończąc się jednak – co za chwilę będzie obszerniej skomentowane – nie próbą identyfikacji czy kategoryzacji obiektów i przejawianych przez nie aktywności – tylko próbą ich scharakteryzowania za pomocą formuł specjalnie zaprojektowanego języka.

Drugi strumień informacji odpowiada temu, co w przypadku ludzi prowadzących obserwację tkwi w ich umysłach jako wynik odpowiedniego treningu, doświadczenia, a także po prostu ich mądrości. To wiedza, którą posiadają doświadczeni policjanci i strażnicy, a której nie posiadają z reguły systemy automatycznie analizujące dane z sensorów systemu monitorującego. Doświadczony policjant czy strażnik potrafi zrozumieć, co robi obserwowana osoba, ponieważ ma tę wiedzę, doświadczenie i mądrość. Dzięki temu może odkryć w pozornie niewinnym zachowaniu obserwowanej osoby jej rzeczywiste intencje, cele i przewidywane niebezpieczne skutki działania. I odwrotnie, może zignorować zachowania pozornie niebezpieczne, prowadzące ewentualną interwencję sił porządkowych, która będzie chybiona, bo w istocie nic poważnego nie zaszło. Taki fałszywy alarm może być źródłem chorej satysfakcji dla nieodpowiedzialnych żartownisiów lub może być źródłem informacji dla rzeczywistych złodziei lub terrorystów, którzy przez takie fałszywe alarmy i pilną obserwację sposobu interwencji sił porządkowych próbują dotrzeć do nieosiągalnych dla nich w inny sposób informacji o organizacji ochrony i jej słabych punktach.

Jeśli system automatyczny, będący na wyposażeniu inteligentnego budynku, ma inteligentnie reagować w złożonych i niejasnych sytuacjach – to trzeba go w taką wiedzę wyposażać. Jest to możliwe, ponieważ stosowane w technice systemów ekspertowych metody pozyskiwania wiedzy od ekspertów dziedzinowych zostały już dobrze rozpracowane i wystandaryzowane. Mając wiedzę ekspertów, możliwości automatycznego wnioskowania oraz mechanizmy rezonansu kognitywnego – używane we wcześniejszych pracach z zakresu automatycznego rozumienia – można podjąć próbę wyposażenia systemu inteligentnego budynku w możliwości semantycznej analizy scen będących przedmiotem monitoringu. Szczegóły realizacji tego procesu będą przedmiotem dalszych prac.

Podziękowanie

Praca współfinansowana przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, projekt INSIGMA nr POIG.01.01.02-00-062/09. Wykorzystano także materiały z projektu SIMPOZ finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu nr 128/R/t00/2010/12. W pracy wykorzystano w charakterze przykładów obrazy uzyskane w ramach wymienionego grantu przez następujących badaczy: Zbigniew Bubliński, Mateusz Komorkiewicz, Tomasz Kryjak, Jaromir Przybyło, Wojciech Chmiel, Mirosław Jabłoński, Stanisław Jędrusik, Joanna Kwiecień, Zbigniew Mikrut, Piotr Szwed, Piotr Pawlik, Paweł Rotter.

Literatura

- [1] CAPAŁKA K.: *Zagadnienie interpretowalności wiedzy i dokładności działania systemów decyzyjnych*, EXIT, Warszawa 2009.
- [2] FLASIŃSKI M.: *Wstęp do sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa 2011.
- [3] GAJECKI L., TADEUSIEWICZ R.: *Language Modeling and Large Vocabulary Continuous Speech Recognition*, Journal Of Applied Computer Science, Vol. 17, No. 2 (2009), pp. 57–70.
- [4] GAJECKI L., TADEUSIEWICZ R.: *Modeling of Polish language for Large Vocabulary Continuous Speech Recognition*, Chapter in book: Demenko G., Jassem K., Szpakowicz S. (Eds.): *Speech and Language Technology*, Vol. 11, Polish Phonetics Association, 2009, pp. 65–70.
- [5] HORZYK A., TADEUSIEWICZ R.: *A Psycholinguistic Model of Man-Machine Interactions Based on Needs of Human Personality*, Chapter in book: Cyran K.A., Kozielski S., Peters J.F., Stańczyk U., Wakulicz-Deja A. (Eds.): *Man-Machine Interactions*, AISC 59, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, pp. 55–67.
- [6] JANKOWSKI N.: *Meta-uczenie w inteligencji obliczeniowej*, EXIT, Warszawa 2011.
- [7] KISIELEWICZ A.: *Sztuczna inteligencja i logika*, WNT, Warszawa 2011.
- [8] NOWICKI R.: *Rozmyte systemy decyzyjne w zadaniach z ograniczoną wiedzą*, EXIT, Warszawa 2009.
- [9] RUTKOWSKI L.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa 2011.
- [10] STĄPOR K.: *Metody klasyfikacji obiektów w wizji komputerowej*, PWN, Warszawa 2011.
- [11] SZCZEPANIAK P.S., TADEUSIEWICZ R.: *The Role of Artificial Intelligence, Knowledge and Wisdom in Automatic Image Understanding*. Journal of Applied Computer Science, Vol. 18, No. 1, 2010, pp. 75–85.
- [12] TADEUSIEWICZ R.: *Introduction to Intelligent Systems*, chapter nr 1 in book: Wilamowski B.M., Irvin J.D. (Eds.): *The Industrial Electronics Handbook – Intelligent Systems*, CRC Press, Boca Raton, 2011, pp. 1-1 – 1-12.
- [13] TADEUSIEWICZ R.: *How Intelligent Should Be System for Image Analysis?* Preface to book: Kwasnicka H., Jain L.C. (Eds.): *Innovations in Intelligent Image Analysis. Studies in Computational Intelligence*, Vol. 339, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2011, pp. V–X.
- [14] TADEUSIEWICZ R.: *Artificial Intelligence Applied to the Intelligent Buildings*, Paper (11 pages) in electronic proceedings: InBus 2011 – 6th International Congress on Intelligent Building Systems, Krakow, 20–21.10.2011. CD-ROM version only.
- [15] TADEUSIEWICZ R.: *Place and Role of Intelligent Systems in Computer Science*. Computer Methods in Materials Science, Vol. 10, 2010, No. 4, pp. 193–206.
- [16] TADEUSIEWICZ R., OGIELA M.R., SZCZEPANIAK P.S.: *Notes on a Linguistic Description as The Basis for Automatic Image Understanding*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 19, No. 1, 2009, pp. 143–150.
- [17] TADEUSIEWICZ R., OGIELA M.R.: *Semantic Content of the Images*, Chapter in Book: Choras R.S., Zabłudowski A. (Eds.): *Image Processing & Communications Challenges*, Academy Publishing House EXIT, Warsaw 2009, pp. 15–29.
- [18] TADEUSIEWICZ R.: *Speech in Human System Interaction*, In: Pardela T. and Wilamowski B. M. (Eds.): *3rd International Conference on Human System Interaction*, Rzeszow, IEEE-Press, 2010, pp. 2–13.
- [19] TADEUSIEWICZ R., DEMENKO G.: *Speech Man-Machine Communication*. Chapter in book: Cyran K.A., Kozielski S., Peters J.F., Stańczyk U., Wakulicz-Deja A. (Eds.): *Man-Machine Interactions*, AISC 59, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2009, pp. 3–10.

Ryszard Tadeusiewicz – AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza,
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej

artykuł recenzowany