

# Artificial intelligence in forensic medicine and related sciences – selected issues

## Sztuczna inteligencja w medycynie sądowej i naukach pokrewnych – wybrane zagadnienia

Michał Szeremeta<sup>[1]</sup>, Julia Janica<sup>[2]</sup>, Anna Niemcunowicz-Janica<sup>[1]</sup>

[1] Zakład Medycyny Sądowej Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku

[2] Studenckie Koło Naukowe z Medycyny Sądowej przy Zakładzie Medycyny Sądowej Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku

### Abstract

**Aim.** The aim of the work is to provide an overview of the potential application of artificial intelligence in forensic medicine and related sciences, and to identify concerns related to providing medico-legal opinions and legal liability in cases in which possible harm in terms of diagnosis and/or treatment is likely to occur when using an advanced system of computer-based information processing and analysis.

**Materials and methods.** The material for the study comprised scientific literature related to the issue of artificial intelligence in forensic medicine and related sciences. For this purpose, Google Scholar, PubMed and ScienceDirect databases were searched. To identify useful articles, such terms as „artificial intelligence,” „deep learning,” „machine learning,” „forensic medicine,” „legal medicine,” „forensic pathology” and „medicine” were used. In some cases, articles were identified based on the semantic proximity of the introduced terms.

**Conclusions.** Dynamic development of the computing power and the ability of artificial intelligence to analyze vast data volumes made it possible to transfer artificial intelligence methods to forensic medicine and related sciences. Artificial intelligence has numerous applications in forensic medicine and related sciences and can be helpful in thanatology, forensic traumatology, post-mortem identification examinations, as well as post-mortem microscopic and toxicological diagnostics. Analyzing the legal and medico-legal aspects, artificial intelligence in medicine should be treated as an auxiliary tool, whereas the final diagnostic and therapeutic decisions and the extent to which they are implemented should be the responsibility of humans.

### Keywords

artificial intelligence, forensic medicine, related sciences, legal liability

## Streszczenie

**Cel.** Celem pracy jest przybliżenie możliwości zastosowania sztucznej inteligencji w medycynie sądowej i naukach pokrewnych oraz wskazanie na wątpliwości związane z opiniowaniem sądowno-lekarskim oraz odpowiedzialnością prawną w sprawach w których do powstania ewentualnej szkody w zakresie diagnostyki i/lub leczenia będzie mogło dojść przy zastosowaniu zaawansowanego systemu przetwarzania i analizy informacji opartych na działaniu komputerów.

**Materiały i metody.** Materiał do badań stanowiło piśmiennictwo naukowe związane z zagadnieniem sztucznej inteligencji w medycynie sądowej i naukach pokrewnych. W tym celu przeszukano bazy danych Google Scholar, PubMed i ScienceDirect. Do zidentyfikowania przydatnych artykułów użyto pojęć, takich jak: "artificial intelligence", "deep learning", "machine learning", "forensic medicine", "legal medicine", "forensic pathology" oraz "medicine". W niektórych przypadkach artykuły zlokalizowano na podstawie semantycznej bliskości wprowadzonych pojęć.

**Wnioski.** Dynamiczny rozwój mocy obliczeniowej oraz zdolność sztucznej inteligencji do analizy ogromnych ilości danych umożliwiły przeniesienie metod sztucznej inteligencji do medycyny sądowej i nauk pokrewnych. Sztuczna inteligencja ma liczne zastosowania w medycynie sądowej oraz naukach pokrewnych i może być pomocna w tanatologii, traumatologii sądowno-lekarskiej, w pośmiertnych badaniach identyfikacyjnych, a także w pośmiertnej diagnostyce mikroskopowej i toksykologicznej. Analizując aspekty prawne i medyczo-sądowe, sztuczna inteligencja w medycynie powinna być traktowana jako narzędzie pomocnicze, natomiast ostateczne decyzje diagnostyczne i terapeutyczne oraz zakres ich realizacji powinien należeć do człowieka.

## Słowa kluczowe

sztuczna inteligencja, medycyna sądowa, nauki pokrewne, odpowiedzialność prawna

## Introduction

Artificial intelligence (AI) is a set of data processed by an artificial neural network and allows it to perform tasks that require a process of learning and taking into account new circumstances in the course of solving a problem. Artificial intelligence has two main purposes [1]. The first is related to how computers work to produce desired positive results for humans and it has applications in industry and the development of new technologies. The second, often related to scientific issues, consists in using artificial intelligence concepts and models in such a way as to help answer queries concerning humans and other living organisms. Therefore, such high hopes are placed in the performance of artificial intelligence in medicine, primarily in the diagnosis and treatment of diseases, forgetting about the risks that its use carries, which may be related to the violation of personal rights or the rights of the patient, or may lead to harm as a result of the use of misdiagnosis or incorrect treatment [2]. The premises related to the liability for medical errors resulting from the use of artificial intelligence at present seem at least debatable and are likely to undergo dynamic modifications with its rapid development.

## Wstęp

Sztuczna inteligencja (ang. Artificial Intelligence – AI) jest zbiorem danych przetworzonych przez sztuczną sieć neuronową i pozwala na wykonywanie zadań wymagających procesu uczenia się i uwzględniania nowych okoliczności w toku rozwiązywania problemu. Sztuczna inteligencja ma dwa główne cele [1]. Pierwszy jest związany z pracą komputerów w celu uzyskania pożądanego przez człowieka pozytywnych wyników i ma zastosowanie w przemyśle oraz rozwoju nowych technologii. Drugi, często związany z zagadnieniami naukowymi, polega na wykorzystaniu pojęć i modeli sztucznej inteligencji w taki sposób, aby pomogły one odpowiedzieć na pytania dotyczące ludzi i innych istot żywych. Dlatego też tak duże nadzieje pokłada się w działaniu sztucznej inteligencji w medycynie, przede wszystkim w diagnostyce i leczeniu chorób, zapominając o ryzyku, które niesie jej zastosowanie i które może mieć związek z naruszeniem dóbr osobistych lub praw pacjenta, czy też może prowadzić do powstania szkody w wyniku zastosowania błędnej diagnostyki lub nieprawidłowego leczenia [2]. Przestanki związane z odpowiedzialnością za błędy medyczne będące następstwem zastosowania sztucznej inteligencji wydają się obecnie co najmniej dyskusyjne i najprawdopodobniej będą poddane dynamicznym modyfikacjom wraz z jej szybkim rozwojem.

Artificial intelligence issues were already analyzed in the middle of the last century [3]. Only the rapid development of computing power and the ability of artificial intelligence to analyze vast data volumes have made it possible in recent years to apply artificial intelligence to everyday practice and scientific research [4]. Within the experimental trend, artificial intelligence is a branch of computer science with the ultimate goal of creating computer programs that simulate intelligent human behavior [5]. These types of behavior include, but are not limited to perceiving, recognizing, learning, handling symbols, using language, problem solving. Computer programs are used simultaneously for experimental and practical purposes, such as recognizing shapes and sounds, running games, proving theorems, formulating expert opinions and medical diagnoses, controlling robots. Advanced computer systems are able to learn from analyzed data and make decisions in an optimal way, while expanding the database and knowledge base [6]. Artificial intelligence works on the basis of a number of methods and tools, both conceptual and material. Conceptual methods can include programming languages, or algorithms for information retrieval and pattern matching. Algorithms are sets of logically and sequentially well-defined instructions or steps according to which a computer should solve a particular problem or perform a specific task. In medicine, artificial intelligence is currently used in monitoring vital functions, in determining clinical diagnoses, and in detecting diseases such as neoplastic skin lesions [7].

The application of artificial intelligence in forensic medicine and related sciences can be based on appropriately trained algorithms that can be used to analyze data, recognize patterns, identify deviations and abnormalities, or suggest diagnoses and further treatment options [8]. The ability of the system to correctly interpret external data and achieve specific goals is based on machine learning, deep learning, artificial neural network, convolutional neural network (CNN) [9, 10, 11, 12]. A typical artificial neural network consists of several layers that perform specific functions: an input layer for posing tasks for solution to the network, an information processing layer, an output layer providing the solution developed by the network. The individual elements of the network forming the layers connect with each other and require a learning process to function optimally in order to strengthen the connections needed and eliminate connections that are not useful for the issue under analysis. The effect of an artificial neural network is subject to uncertainty due to unawareness of the actual content of the set created during learning and the parameters adopted by individual nodes of the network to give weight to individual observations. Explainable artificial intelligence (XAI) is used to solve this problem to understand how artificial intelligence makes specific decisions [13, 14]. The second key parameter that determines the usefulness of artificial intelligence is the quality of databases. Clearly, the database should not contain errors or low-quality data. An optimal database should be complete, unique and accurate, and it should con-

Zagadnienia związane ze sztuczną inteligencją były przedmiotem analiz już w połowie ubiegłego wieku [3]. Dopiero dynamiczny rozwój mocy obliczeniowej oraz zdolność sztucznej inteligencji do analizy ogromnych ilości danych umożliwiły w ostatnich latach zastosowanie sztucznej inteligencji w codziennej praktyce i badaniach naukowych [4]. W nurcie doświadczalnym sztuczna inteligencja stanowi dział informatyki, w którym docelowo tworzy się programy komputerowe symulujące inteligentne zachowania człowieka [5]. Do tych zachowań należą między innymi: postrzeganie, rozpoznawanie, uczenie się, operowanie symbolami, posługiwanie się językiem, rozwiązywanie problemów. Programy komputerowe stosuje się równocześnie w celach eksperymentalnych oraz praktycznych, takich jak: rozpoznawanie kształtów i dźwięków, prowadzenie gier, dowodzenie twierdzeń, formułowanie ekspertyz i rozpoznań medycznych, sterowanie robotami. Zaawansowane systemy komputerowe potrafią się uczyć na podstawie analizowanych danych i podejmować decyzje w sposób optymalny, przy równoczesnym poszerzaniu bazy danych i wiedzy [6]. Sztuczna inteligencja działa w oparciu o wiele metod i narzędzi, zarówno konceptualnych jak i materialnych. Do metod konceptualnych możemy zaliczyć języki programowania, czy algorytmy wyszukiwania informacji oraz dopasowywania wzorców. Algorytmy to dobrze logicznie i sekwencyjnie zdefiniowane zestawy instrukcji lub kroków, według których komputer powinien rozwiązać konkretny problem lub wykonać określone zadanie. W medycynie sztuczna inteligencja jest obecnie stosowana w monitorowaniu funkcji życiowych, przy ustalaniu rozpoznań klinicznych, a także w wykrywaniu chorób, jak np. zmiany nowotworowe skóry [7].

Zastosowanie sztucznej inteligencji w medycynie sądowej i naukach pokrewnych może opierać się na odpowiednio wytrenowanych algorytmach, które mogą posłużyć do analizowania danych, rozpoznawania wzorców, identyfikowania odchyleń i nieprawidłowości lub sugerowania rozpoznań oraz sposobów dalszego postępowania [8]. Zdolność systemu do prawidłowego interpretowania danych zewnętrznych oraz osiągnięcia określonych celów opiera się na uczeniu maszynowym (ang. Machine learning), uczeniu głębokim (ang. Deep learning), sztucznych sieciach neuronowych (ang. Artificial neural network), konwolucyjnych (splotowych) sieciach neuronowych (ang. Convolutional neural network – CNN) [9, 10, 11, 12]. Typowa sztuczna sieć neuronowa składa się z kilku warstw, które pełnią określone funkcje: warstwa wejściowa służąca do stawiania sieci zadań do rozwiązania, warstwa przetwarzania informacji, warstwa wyjściowa udostępniająca rozwiązanie opracowane przez sieć. Poszczególne elementy sieci wchodzące w skład warstw łączą się ze sobą i do optymalnego funkcjonowania wymagają procesu uczenia się, w celu wzmocnienia potrzebnych połączeń oraz eliminacji połączeń nieprzydatnych z punktu widzenia analizowanego zagadnienia. Efekt działania sztucznej sieci neuronowej jest obciążony niepewnością wynikającą z niewiedzy co do faktycznej zawartości zbioru utworzonego podczas uczenia się oraz parametrów

tain the right data type for the right model and the data sets must fit into the specific variables to which they are assigned.

## Materials and methods

The material for the study consisted of scientific literature related to the issue of artificial intelligence in forensic medicine and related sciences. For this purpose, the databases Google Scholar, PubMed and ScienceDirect were searched. To identify useful articles, such terms as “artificial intelligence,” “deep learning,” “machine learning,” “forensic medicine,” “legal medicine,” “forensic pathology,” and “medicine,” were used as well as the traditional information search method of checking whether the searched item can be found in the above databases. In some cases, articles were identified based on the semantic proximity of the introduced terms. Such an activity is characteristic of vector embeddings, which use varying similarity measures for different approximate nearest neighbor (ANN) algorithms. This provides an opportunity to explore and determine the meaning of relationships between data, and also provides an opportunity to reveal similar elements or suggestions based on the context of the query, finding the nearest neighbors of a given (vector) query [15].

### Practical application of artificial intelligence

On the basis of the available literature, artificial intelligence potentially has numerous applications in forensic medicine, such as assessing the mechanism and time of injury; assessing the time of death; identifying corpses of undetermined identity; and identifying victims of disasters.. In addition, artificial intelligence can provide assistance in post-mortem microscopic examinations, post-mortem imaging, and toxicological diagnostics.

### Assessment of the time of injury

Estimation of the time elapsed from the moment of injury in the case of wounds, burns, or sagillations is possible primarily in post-mortem examinations, since only in the case of deceased persons it is possible to collect material for examination without health risks for the subject [16].

przyjętych przez indywidualne węzły sieci do nadania wagi poszczególnym obserwacjom. Do rozwiązania tego problemu stosuje się wyjaśnialną sztuczną inteligencję (ang. Explainable Artificial Intelligence – XAI), która pozwala na zrozumienie w jaki sposób sztuczna inteligencja podejmuje konkretne decyzje [13, 14]. Drugim kluczowym parametrem decydującym o przydatności sztucznej inteligencji jest jakość baz danych. Nie ulega wątpliwości, że baza danych nie powinna zawierać błędów, czy też danych niskiej jakości. Optymalna baza danych powinna być kompletna, wyjątkowa i dokładna, a także zawierać odpowiedni typ danych dla odpowiedniego modelu a zbiory danych muszą mieścić się w określonych zmiennych, do których zostały przypisane.

## Materiał i metody

Materiał do badań stanowiło piśmiennictwo naukowe związane z zagadnieniem sztucznej inteligencji w medycynie sądowej i naukach pokrewnych. W tym celu przeszukano bazy danych Google Scholar, PubMed i ScienceDirect. Do zidentyfikowania przydatnych artykułów użyto pojęć, takich jak: “artificial intelligence”, “deep learning”, “machine learning”, “forensic medicine”, “legal medicine”, “forensic pathology” i “medicine” oraz tradycyjnej metody wyszukiwania informacji polegającej na sprawdzeniu, czy wyszukiwany element znajduje się w ww. bazach danych. W niektórych przypadkach artykuły zlokalizowano na podstawie semantycznej bliskości wprowadzonych pojęć. Takie działanie jest charakterystyczne dla wektorowych baz danych (ang. Vector embeddings), wykorzystujących zróżnicowane miary podobieństwa dla różnych algorytmów przybliżonego wyszukiwania najbliższego sąsiada (ang. Approximate nearest neighbor – ANN). Daje to możliwość poznania i określenia znaczenia relacji pomiędzy danymi, a także stwarza możliwość ujawnienia podobnych elementów lub sugestii w oparciu o kontekst zapytania, znajdując najbliższych sąsiadów danego (wektorowego) zapytania [15].

### Praktyczne zastosowanie sztucznej inteligencji

Z dostępnego piśmiennictwa wynika, że sztuczna inteligencja potencjalnie może mieć liczne zastosowania w medycynie sądowej, jak: ocena mechanizmu i czasu powstania obrażeń ciała; ocena czasu zgonu; identyfikacja zwłok o nieustalonej tożsamości oraz identyfikacja ofiar katastrof. Ponadto sztuczna inteligencja może być pomocna w pośmiertnych badaniach mikroskopowych, w pośmiertnych badaniach obrazowych, a także w diagnostyce toksykologicznej.

### Ocena czasu powstania obrażeń ciała

Szacowanie czasu, który upłynął od momentu doznania urazu w przypadku ran, oparzeń lub podbiegnięć krwawych jest możliwe przede wszystkim w badaniach pośmiertnych, ponieważ tylko w przypadku osób zmarłych istnieje możliwość pobrania, nie niosącego ryzyka zdrowotnego dla osoby badanej, materiału do badań [16].

The appearance of the sagillation, primarily its shape, color as well as the appearance of the edges (well demarcated or fuzzy) provides a way to infer whether the sagillation is fresh or of an earlier date. The aforementioned features are simultaneously helpful in verifying the circumstances of the injury suffered [17]. To investigate "how old" the sagillation is, histological methods, genetic methods, or colorimetry or spectrophotometry have been used so far [18, 19, 20].

Attempts by physicians to assess the time of the sagillation based on their appearance captured in photographs have so far not been highly reliable, primarily due to discrepancies between the captured and the actual image. Only the use of an artificial neural network when estimating the time of onset of the sagillation based on photographic documentation resulted in 97% sensitivity and 99.5% specificity for fresh and fairly fresh sagillations with the known time of injury. However, when tested by a human, the sensitivity and specificity determined by the same experiment was about 50% [21]. There is no doubt that the results obtained depend on the quantity and quality of the data, as well as the experience of the evaluators, and are therefore subject to high uncertainty.

### Assessment of the time of death

Estimating the time of death depends on a variety of processes and phenomena, which are usually characterized by significant dynamics after death. From the point of view of the applicability of artificial intelligence in assessing the time of death, chemical, biochemical and metabolic processes are crucial [22, 23, 24], as well as changes of a decomposing nature, primarily decaying [25]. Artificial intelligence related to neural network systems based on statistical data and created algorithms can be helpful in determining the time elapsed since death by analyzing changes in the levels of biomarkers in the tissues or body fluids under study. Using the capabilities of artificial intelligence to analyze massive volumes of data and simultaneously assess post-mortem changes in numerous parameters (biomarkers), increases the accuracy of the analysis performed, and thus the ability to estimate the actual time of death [26].

In the case of decomposition processes associated with microbial activity, a key phenomenon that helps determine the time that has elapsed since death is the phenomenon of succession. The influx of nutrients into the soil from a corpse initiates a common biological chain of events at the microbial level [27]. At present, the application of the succession phenomenon to estimate the time of death using bacterial and fungal microflora is limited by insufficient data that can be interpreted by artificial intelligence techniques. Due to the highly complex impact of the external environment in which corpses may remain, such as in the air or in water, and taking into account changing weather conditions, it is necessary to

Wygląd podbiegnięcia krwawego, przede wszystkim jego kształt, barwa jak i charakter brzegów (dobrze odgraniczone lub rozmyte) pozwala na wnioskowanie czy podbiegnięcie krwawe jest świeże, czy jest starszej daty. Wyżej wymienione cechy są równocześnie pomocne w weryfikacji okoliczności doznania urazu [17]. Do badania „wieku” podbiegnięcia krwawego stosowano dotychczas metody histologiczne, genetyczne, czy też używano kolorimetrii lub spektrofotometrii [18, 19, 20].

Próby oceny czasu doznania podbiegnięcia krwawego na podstawie ich wyglądu utrwalonego na zdjęciach przez lekarzy do tej pory nie były wysoce wiarygodne, przede wszystkim w związku z rozbieżnościami pomiędzy obrazem utrwalonym a obrazem rzeczywistym. Dopiero zastosowanie sztucznej sieci neuronowej podczas szacowania czasu powstania podbiegnięcia krwawego w oparciu o dokumentację fotograficzną pozwoliło na uzyskanie 97 % czułości i 99,5 % swoistości w przypadku świeżych i dość świeżych podbiegnięć krwawych o znanym czasie urazu. Natomiast w przypadku badania przez człowieka czułość i swoistość określona w ramach tego samego eksperymentu wyniosła około 50 % [21]. Nie ulega wątpliwości, że uzyskane wyniki zależą od liczebności i jakości danych, jak i doświadczenia osób oceniających, dlatego też obarczone są wysoką niepewnością.

### Ocena czasu zgonu

Szacowanie czasu zgonu jest zależne od różnorodnych procesów i zjawisk, które charakteryzują się najczęściej znaczną dynamiką po śmierci. Z punktu widzenia możliwości zastosowania sztucznej inteligencji przy ocenie czasu zgonu kluczowe znaczenie mają procesy chemiczne, biochemiczne i metaboliczne [22, 23, 24], a także zmiany o charakterze rozkładowym, przede wszystkim gnicie [25]. Sztuczna inteligencja związana z systemami sieci neuronowych w oparciu o dane statystyczne i stworzone algorytmy może być pomocna w ustaleniu czasu który upłynął od zgonu analizując zmiany w poziomach biomarkerów w badanych tkankach lub płynach ustrojowych. Wykorzystywanie możliwości sztucznej inteligencji do analizy ogromnych ilości danych oraz równoległej oceny zmian posmiertnych licznych parametrów (biomarkerów) zwiększa dokładność przeprowadzonej analizy, a tym samym możliwość oszacowania rzeczywistego czasu zgonu [26].

W przypadku procesów rozkładowych związanych z działaniem drobnoustrojów kluczowym zjawiskiem pomocnym w ustaleniu czasu który upłynął od śmierci jest zjawisko sukcesji. Napływ substancji odżywczych do gleby ze zwłok inicjuje wspólny biologiczny łańcuch zdarzeń na poziomie mikroorganizmów [27]. W chwili obecnej zastosowanie zjawiska sukcesji do oceny czasu zgonu przy użyciu mikroflory bakteryjnej i grzybiczej jest ograniczone zbyt małą liczbą danych, które mogłyby być interpretowane przez techniki sztucznej inteligencji. Ze względu na bardzo złożony wpływ środowiska zewnętrznego w których mogą przebywać zwłoki, np. na powietrzu lub w wodzie, a także przy uwzględnieniu zmiennych warunków pogodowych, ko-

create and develop microbiome biobanks for forensic purposes. It is only with optimal databases that the use of artificial neural networks in determining the time of death will be entirely possible [28].

### **Identification of corpses of undetermined identity and identification of disaster victims**

Identification of corpses of undetermined identity and disaster victims uses traditional methods including facial description, tattoos, scars, distinguishing marks on the body, as well as anthropological and odontological evaluation, among others. These methods are now supported by fingerprint analysis and DNA testing [29].

One of the key areas to use artificial intelligence in connection with identification is image analysis, therefore, in recent years, attempts have been made to use deep learning in computer-aided detection systems for studies such as assessing the degree of mineralization of teeth, assessing the degree of mineralization of long bone epiphyses, assessing the degree of bone density, or assessing the shape of the frontal sinus [30]. Nowadays, multilayer structures that form convolutional neural networks are able to automatically detect important features without human supervision. They are used to extract objects using computed tomography based on input data, which are sequences of radiological three-dimensional or two-dimensional images [31].

On a large scale, the "Automated Fingerprint Identification System" could also be used to identify corpses with unknown identities, which is currently handled by operators with competencies confirmed by Central Forensic Laboratory of the Police. Currently, it is permissible to take fingerprints in situations where they are useful for detection, evidence or identification. Therefore, the introduction of the possibility of analyzing the data contained in the databases of the aforementioned system by artificial intelligence, with appropriately framed legislation and properly developed databases, would create the possibility of automatic comparison of fingerprints from the database with the fingerprints of an unidentified person, practically in any case and without the participation of often inaccessible specialists.

In the future, biometric physical characteristics such as iris pattern, fingerprints, facial and hand geometry, as well as the shape of the auricle, may be obligatorily entered into information systems. In addition, databases will be able to include behavioral traits, such as tone of voice, the way one walks or the way one types on a keyboard. In such a situation, the establishment of identity will be based on matching the obtained biometric pattern with the individual data of the person previously stored in the database [32].

nieczne jest tworzenie i rozwój biobanków mikrobiomów do celów kryminalistycznych. Dopiero optymalne bazy danych pozwolą w pełni na użycie sztucznych sieci neuronowych w ustalaniu czasu zgonu [28].

### **Identyfikacja zwłok o nieustalonej tożsamości oraz identyfikacja ofiar katastrof**

Identyfikacja zwłok o nieustalonej tożsamości oraz ofiar katastrof wykorzystuje tradycyjne metody obejmujące między innymi opis twarzy, tatuaży, blizn, znaków szczególnych na ciele, a także ocenę antropologiczną i odontologiczną. Metody te są obecnie wspomagane przez analizę odcisków palców oraz badanie DNA [29].

Jednym z kluczowych obszarów do wykorzystania sztucznej inteligencji w związku z identyfikacją jest analiza obrazu, dlatego też w ostatnich latach podjęto próby wykorzystania uczenia głębokiego w systemach wykrywania wspomaganego komputerowo do takich badań jak ocena stopnia mineralizacji zębów, ocena stopnia zmineralizowania nasad kości długich, ocena stopnia gęstości kości lub ocena kształtu zatoki czołowej [30]. Obecnie wielowarstwowe struktury tworzące splotowe sieci neuronowe są w stanie automatycznie wykrywać ważne cechy bez nadzoru człowieka. Wykorzystywane są one do wyodrębniania obiektów z zastosowaniem tomografii komputerowej na podstawie wprowadzonych danych wejściowych, którymi są sekwencje radiologicznych obrazów trójwymiarowych lub dwuwymiarowych [31].

Na dużą skalę do identyfikacji zwłok o nieznannej tożsamości mógłby także posłużyć „Automatyczny System Identyfikacji Daktyloskopijnej”, do którego obsługi obecnie wykorzystywani są operatorzy o kompetencjach potwierdzonych przez Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Policji. Obecnie dopuszczalne jest pobranie odcisków palców w sytuacji kiedy są one przydatne wykrywczo, dowodowo lub identyfikacyjnie. Dlatego też wprowadzenie możliwości analizowania danych zawartych w bazach ww. systemu przez sztuczną inteligencję, przy odpowiednio ukształtowanych przepisach prawnych i odpowiednio opracowanych bazach danych, stwarzałoby możliwość automatycznego porównywania linii papilarnych z bazy z liniami papilarnymi niezidentyfikowanej osoby, praktycznie w każdej sprawie i bez udziału często trudno dostępnych specjalistów.

W przyszłości do systemów informatycznych obligatoryjnie mogą być wprowadzone biometryczne cechy fizyczne, jak: wzór tęczywki, linie papilarne, geometria twarzy i rąk, a także kształt małżowiny usznej. Dodatkowo bazy danych będą mogły zawierać cechy behawioralne, jak: barwa głosu, sposób chodzenia lub sposób pisania na klawiaturze. W takiej sytuacji ustalenie tożsamości będzie polegało na dopasowaniu uzyskanego wzoru biometrycznego do indywidualnych danych osoby zapisanych uprzednio w bazie danych [32].

## Post-mortem microscopic examinations

Forensic microscopic examination is part of a comprehensive post-mortem diagnosis and is often conclusive about the cause of death, or the mechanism of the injuries sustained [33, 34]. The introduction of digital equipment such as high-sensitivity or high-resolution microscopes and scanners has created new opportunities in histopathological diagnostics supported by artificial intelligence. Despite the fact that images obtained from microscopic slides are more complex than radiological images, properly designed algorithms are able to analyze them and, based on databases, determine the common features of a particular disease entity or traumatic lesion. A prerequisite for the effectiveness of artificial intelligence to identify changes is the standardization of the assessed image [35]. Nowadays, microscopic diagnosis with the help of artificial intelligence is the main focus in the evaluation of neoplastic lesions. Convolutional neural networks found application in automatic assessment of a lung cancer subtype [36]. The algorithm prepared based on the data of "The Cancer Genome Atlas" was able to assess with high probability whether the lesion is benign, or diagnose adenocarcinoma or squamous cell carcinoma. On the other hand, a study comparing the sensitivity and specificity of blood microscopic examinations in terms of their ability to detect *Plasmodium malariae* infection showed that a fully automated microscopic diagnostic system based on the artificial intelligence system "The EasyScan Go" did not match the efficiency of an examination conducted using a light microscope, in which the image was evaluated by a specialist [37]. Meanwhile, further development of the aforementioned system related to at least improving the database and training artificial intelligence will increase its efficiency.

Despite the limitations that still exist in the interpretation of microscopic examinations, the use of improved algorithms, as well as the addition of standardized microscopic images to databases, should make it easy to transfer automated diagnostic imaging to forensic medicine. An example of this is a study by Garland J. et al. in which the use of convolutional neural network allowed the differentiation with 95 % accuracy of a normal microscopic image of myocardium from muscle affected by fresh infarction and past infarction [38].

## Post-mortem imaging tests

Recent decades have brought the new term "virtopsy" into the medico-legal vocabulary. Virtopsy is a term derived from the two words "virtual" and "autopsy," which uses imaging methods routinely used in clinical medicine, such as computed tomography and magnetic resonance imaging to determine the injuries sustained by the deceased and the cause and mechanism of death [39]. With the techniques used during a single

## Pośmiertne badania mikroskopowe

Sądowo-lekarskie badanie mikroskopowe jest częścią kompleksowej diagnostyki pośmiertnej i niejednokrotnie rozstrzyga o przyczynie zgonu, czy też o mechanizmie doznanych obrażeń ciała [33, 34]. Wprowadzenie do użytku sprzętu cyfrowego takiego jak wysokoczułe lub o wysokiej rozdzielczości mikroskopy i skanery stworzyło nowe możliwości w histopatologicznej diagnostyce wspieranej przez sztuczną inteligencję. Pomimo iż obrazy uzyskane z preparatów mikroskopowych są bardziej złożone niż obrazy radiologiczne, odpowiednio zaprojektowane algorytmy są w stanie je przeanalizować i w oparciu o bazy danych ustalić cechy wspólne dla danej jednostki chorobowej lub zmiany pourazowej. Warunkiem skuteczności identyfikacji zmian przez sztuczną inteligencję jest standaryzacja ocenianego obrazu [35]. Obecnie w diagnostyce mikroskopowej przy współdziałaniu sztucznej inteligencji główny nacisk kładzie się ocenę zmian nowotworowych. Splotowe sieci neuronowe znalazły zastosowanie w automatycznej ocenie podtypu raka płuca [36]. Algorytm przygotowany w oparciu o dane „The Cancer Genome Atlas” był w stanie ocenić z dużym prawdopodobieństwem, czy zmiana jest łagodna lub rozpoznać gruczolakoraka albo raka płaskonabłonkowego. Z drugiej strony przeprowadzone badania porównujące czułość i swoistość badań mikroskopowych krwi w zakresie możliwości wykrywania zakażenia zarodźcem malarii wykazały, że w pełni zautomatyzowany mikroskopowy system diagnostyczny opierający się na systemie sztucznej inteligencji „The EasyScan Go” nie dorównuje skuteczności badania przeprowadzonego przy użyciu mikroskopu świetlnego, w którym obraz oceniał specjalista [37]. Natomiast dalszy rozwój ww. systemu związany z chociażby z udoskonaleniem bazy danych i trenowaniem sztucznej inteligencji zwiększy jego skuteczność.

Pomimo występujących jeszcze ograniczeń w interpretacji badań mikroskopowych, zastosowanie ulepszonych algorytmów, a także uzupełnienie baz danych o wystandaryzowane obrazy mikroskopowe powinno pozwolić na łatwe przeniesienie automatycznej diagnostyki obrazowej do medycyny sądowej. Przykładem takiego działania jest badanie przeprowadzone przez Garland J. i wsp. w którym zastosowanie splotowej sieci neuronowej pozwoliło na zróżnicowanie z 95 % dokładnością prawidłowego obrazu mikroskopowego mięśnia sercowego od mięśnia objętego zawałem świeżym i zawałem przebyłym [38].

## Pośmiertne badania obrazowe

Ostatnie dziesięciolecie wniosły do słownika medycyny sądowej nowe pojęcie „wirtopsja”. Wirtopsja to termin wywodzący się z dwóch słów „wirtualny” i „autopsja”, który wykorzystuje metody obrazowania rutynowo stosowane w medycynie klinicznej, takie jak tomografia komputerowa i rezonans magnetyczny, w celu ustalenia obrażeń jakich doznał zmarły oraz przyczyny i mechanizmu zgonu [39]. Dzięki technikom zastoso-

examination, using CT or MRI, several thousand images of the organ under examination are created, which the computer combines into a single three-dimensional image [40]. The resulting images can be cataloged and evaluated using artificial intelligence methods. Appropriately trained algorithms will allow the identification of lesions and injuries based on the images obtained, comparing this with the vast volume of input data provided to the system, making it possible to determine the cause of death, or the mechanism of injury sustained [41]. Such a technique can also be helpful in determining the tool used by analyzing the characteristics and dimensions of the injury in comparison with the data contained in the memory of the system, including, for example, firearm injuries that allow determining the type and caliber of the weapon. This activity is possible, among other things, thanks to an algorithm called "Automatic Ballistic Identification System" [42].

### Toxicological examinations

With the development of information systems and technology, a number of machine learning algorithms dedicated to the analysis of toxicological data have been developed, influenced by the complex nature of the data available for toxicological analysis. To date, there is no single, universal analytical procedure for detecting poisons or drugs most commonly encountered in medico-legal practice. Since the variety of potential chemical compounds requires multiple analytical techniques to identify them, and xenobiotics or drugs can exhibit numerous interactions, to date there is no consensus on which machine learning algorithm is optimal for a particular analysis. At the same time, it is important to note that individual variability can play a significant role in toxicological inference, as well as the purpose of the analysis itself (screening, evidentiary testing). Therefore, the operation of artificial intelligence in the interpretation of toxicological analyses requires a comparison of the performance of various machine learning algorithms [43, 44].

Information related to the toxic effect of the substance, its metabolism and kinetics is also an important aspect of the final interpretation of the results of the toxicological analysis. Thus, what can have efficient application of artificial intelligence in the interpretation of toxicological analysis are very complex artificial neural networks [45]. Algorithms based on these networks should not only account for the analytical result itself, but also for the time of exposure of the body to the applied dose, since fatal poisoning can be of an acute as well as chronic character [46]. Finally, it should be added that the analysis of such a large number of variables as in the case of toxicological examinations will require the use of appropriately large and properly designed databases, as well as advanced computers dedicated to artificial intelligence. A problem that may also play an important role in the future is the very description of the procedure based on which the final report of the study is obtained. Currently, every expert is obliged to de-

wanym w czasie jednego badania, przy użyciu tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego, powstaje kilka tysięcy ujęć badanego narządu, które komputer łączy w jeden trójwymiarowy obraz [40]. Uzyskane w ten sposób obrazy mogą zostać skatalogowane i poddane ocenie przy użyciu metod sztucznej inteligencji. Odpowiednio wytrenowane algorytmy pozwolą na identyfikację zmian chorobowych i urazowych na podstawie uzyskanych obrazów, porównując to z ogromną ilością danych wejściowych dostarczanych do systemu, co pozwoli na określenie przyczyny zgonu, czy też mechanizmu doznania obrażenia [41]. Taka technika może być również pomocna w określaniu użytego narzędzia poprzez analizę cech charakterystycznych i wymiarów obrażeń w porównaniu z danymi zawartymi w pamięci systemu, w tym np. obrażeń z broni palnej pozwalających na ustalenie rodzaju i kalibru broni. Działanie takie jest możliwe między innymi dzięki algorytmowi o nazwie „Automatyczny System Identyfikacji Balistycznej” [42].

### Badania toksykologiczne

Wraz z rozwojem systemów informatycznych oraz technologii opracowano szereg algorytmów uczenia maszynowego dedykowanego analizie danych toksykologicznych na co wpływ miał złożony charakter danych dostępnych w analizie toksykologicznej. Jak dotąd nie istnieje jedna, uniwersalna procedura analityczna umożliwiająca wykrycie trucizn lub leków najczęściej spotykanych w praktyce medycno-sądowej. Ponieważ różnorodność potencjalnych związków chemicznych wymaga zastosowania wielu technik analitycznych w celu ich identyfikacji, a także ksenobiotyki lub leki mogą wykazywać liczne interakcje, do dnia dzisiejszego nie ma konsensusu co do tego, który z algorytmów uczenia maszynowego jest optymalny do konkretnej analizy. Równocześnie należy pamiętać, że w przypadku wnioskowania toksykologicznego znaczącą rolę może odgrywać zmienność osobnicza, jak i sam cel analizy (badanie przesiewowe, badanie dowodowe). Dlatego też działanie sztucznej inteligencji w interpretacji analiz toksykologicznych wymaga porównania działania różnych algorytmów uczenia maszynowego [43, 44].

Istotnym aspektem końcowej interpretacji wyników analizy toksykologicznej są także informacje związane z działaniem toksycznego substancji, jej metabolizmie oraz kinetyce. Dlatego też efektywne zastosowanie sztucznej inteligencji w interpretacji analiz toksykologicznych mogą mieć bardzo złożone sztuczne sieci neuronowe [45]. Algorytmy oparte na tych sieciach powinny uwzględniać nie tylko sam wynik analityczny, ale także czas ekspozycji ustroju na zastosowaną dawkę, ponieważ zatrucia śmiertelne mogą mieć charakter ostry jak i przewlekły [46]. Na końcu należy dodać, że do analizy tak dużej liczby zmiennych jak w przypadku badań toksykologicznych wymagane będzie stosowanie odpowiednio dużych i prawidłowo zaprojektowanych baz danych, a także zaawansowanych komputerów dedykowanych sztucznej inteligencji. Problemem, który także może odgrywać istotną rolę w przyszłości jest sam opis procedury w oparciu o którą uzyskano raport końcowy



scribe the analytical process from the moment the sample is collected or delivered for testing to the stage of formulating the final conclusions. When artificial intelligence begins to play a significant role in the study, the description of the procedure may require information related to how the algorithm works [47].

### Legal liability vs. artificial intelligence

In addition to medical examination and diagnosis based on well-established knowledge, today's medicine also uses previously unavailable modern procedures, such as health risk monitoring using mobile apps, risk assessment of disease development based on genetic testing [48], telemedicine, surgical techniques using robots [49]. While the use of remote information and communication systems is an acceptable form of providing medical services [50, 51], it is currently difficult to clearly indicate who could or should ultimately be liable in the event of a complete failure of such a system, or its temporary malfunction, resulting in harm to the patient's health. This issue will increasingly emerge in discussions related to legal science and providing medico-legal opinions, as remote medical support systems can already find application not only within the scope of a family physician's practice or as part of outpatient treatment [52, 53], but also in highly specialized procedures, for example, the possibility for a dialysis station physician to provide services using ICT systems or communication systems related to peritoneal dialysis and hemodialysis [54].

Since robotic surgical treatment has already been proven effective for prostate cancer lesions [55], rectal cancer [56], or gastric cancer lesions [57], the extensive use of artificial intelligence in determining treatment strategies, autonomous execution of surgery [58], or controlled or autonomous evaluation of intraoperative images during robotic surgical treatment should be available within the next few years [59].

Addressing the issue of liability for any damage arising from the application of artificial intelligence in medicine, there is no doubt that at present, according to the current state of the law, such liability rests with a natural person, a legal person or an organizational entity with legal capacity [60]. However, none of the above criteria is met by computer software, including one that would achieve advanced autonomous thinking capabilities in the future, or a machine that executes commands based on highly complex artificial intelligence algorithms. At this point in time, it is also difficult to imagine a manufacturer's liability for the operation of artificial intelligence in medicine if the manufacturer has marketed the computer software separately from the dedicated hardware and is not involved in the sale of devices on which the relevant computer software can be used [61]. Sooner, one should expect attempts to attribute liability to a person or an organizational unit for damage

z badania. Obecnie każdy biegły jest zobligowany do opisanie procesu analitycznego od momentu pobrania lub dostarczenia próbki do badania do etapu formułowania końcowych wniosków. W sytuacji kiedy w badaniu znaczącą rolę zacznie odgrywać sztuczna inteligencja opis procedury może wymagać informacji związanych ze sposobem działania algorytmu [47].

### Odpowiedzialność prawna a sztuczna inteligencja

Dzisiejsza medycyna oprócz badania lekarskiego i diagnostyki opartej na ugruntowanej wiedzy wykorzystuje także niedostępne wcześniej nowoczesne procedury, jak: monitorowanie zagrożeń zdrowotnych z wykorzystaniem aplikacji mobilnych, ocenę ryzyka rozwoju chorób w oparciu o badania genetyczne [48], telemedycynę, techniki operacyjne wykorzystujące roboty [49]. O ile stosowanie zdalnych systemów teleinformatycznych lub systemów łączności jest dopuszczalną formą udzielania świadczeń medycznych [50, 51], o tyle w chwili obecnej trudno jest jednoznacznie wskazać, kto ostatecznie mógłby lub powinien ponosić odpowiedzialność w sytuacji całkowitej awarii takiego systemu, lub jego przejściowego nieprawidłowego działania, skutkującego uszczerbkiem na zdrowiu pacjenta. Problem ten będzie coraz częściej pojawiał się w dyskusji związanej z naukami prawnymi oraz opiniowaniem sądowo-lekarskim, ponieważ zdalne systemy pomocy medycznej już dzisiaj mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w ramach praktyki lekarza rodzinnego, czy też w ramach leczenia ambulatoryjnego [52, 53], ale także w procedurach wysokospecjalistycznych, jak np. możliwość realizacji przez lekarza stacji dializ świadczeń z wykorzystaniem systemów teleinformatycznych lub systemów łączności związanych z dializą otrzewnową i hemodializą [54].

Ponieważ już dziś dowiedziono skuteczności leczenia zabiegowego przy użyciu robota w przypadku zmian nowotworowych prostaty [55], raka odbytu [56], czy też zmian nowotworowych w obrębie żołądka [57], szerokie zastosowanie sztucznej inteligencji w ustalaniu strategii leczenia, autonomicznego przeprowadzenia zabiegu operacyjnego [58], czy też kontrolowanej lub autonomicznej oceny obrazów śródoperacyjnych w czasie leczenia zabiegowego z użyciem robota powinno być dostępne w ciągu kilku kolejnych lat [59].

Wracając do zagadnienia odpowiedzialności za ewentualną szkodę powstałą w związku z zastosowaniem sztucznej inteligencji w medycynie nie ulega wątpliwości, że obecnie, zgodnie z obowiązującym stanem prawnym, odpowiedzialność taka spoczywa na osobie fizycznej, osobie prawnej lub jednostce organizacyjnej posiadającej zdolność prawną [60]. Żadnego z powyższych kryteriów nie spełnia natomiast oprogramowanie komputerowe, w tym takie, które osiągnęłoby w przyszłości zaawansowaną zdolność autonomicznego myślenia, jak i maszyna wykonująca polecenia oparte na bardzo złożonych algorytmach sztucznej inteligencji. Na chwilę obecną trudno jest także sobie wyobrazić odpowiedzialność producenta za działa-

caused to a patient, related to possible improper correction of the operation of artificial intelligence, improper interpretation of the results of artificial intelligence, or failure of a member of the medical staff to comply with the results of the assessment of the analyzed medical problem obtained by artificial intelligence.

The concerns that are likely to quickly arise in the field of providing medico-legal opinions will relate not only to the biologically measurable negative effects associated with the use of artificial intelligence in medicine, but will also be related to the violation of patient rights. For example, according to the provisions of the Act of December 5, 1996 on the profession of a physician and dentist, except in special situations, before initiating diagnostic and therapeutic procedures, including those of a surgical nature, the physician should make every effort to avoid extending or changing the planned therapeutic procedure in the course of treatment [62, 63]. Thus, consent to a certain type of procedure does not automatically equal consent to all actions, even when they are medically justified. How would the operation of an autonomous surgical robot, for example, which, based on the analysis of intraoperative images and databases, would decide to expand the scope of surgical treatment for medical indications, be treated in such a situation. Who would realistically violate the patient's rights in such a situation: the physician supervising or ordering the procedure, the autonomous robot, the software manufacturer?

Vesting legal capacity even in the most advanced artificial intelligence would most probably involve accounting for its role in the legislative process, or understanding on the basis of what criteria the software of such high degree of autonomy will aim for fulfillment of goals or assumptions. Therefore, at least for the time being, still the most reasonable manner of proceeding is treating artificial intelligence solely as an auxiliary tool for the person rendering medical services, provided that only a human being should take ultimate decisions on the choice of diagnostic and/or therapeutic method and the manner of its performance respecting patient's rights. Thus, within the range of providing medico-legal opinions, the medical issue analysis should first and foremost include assessment of medical staff proceedings accounting for precautions, due diligence, indications of current medical knowledge and ethics, whereas artificial intelligence should be treated as an auxiliary tool.

nie sztucznej inteligencji w medycynie, jeżeli producent wprowadził do obrotu oprogramowanie komputerowe oddzielnie od dedykowanego sprzętu i nie zajmuje się sprzedażą urządzeń na których może być zastosowane odpowiednie oprogramowanie komputerowe [61]. Prędzej należy spodziewać się prób przypisania osobie lub jednostce organizacyjnej odpowiedzialności za szkody powstałe u pacjenta, związane z ewentualną nieprawidłową korektą działania sztucznej inteligencji, niewłaściwą interpretacją wyników pracy sztucznej inteligencji, czy też niezastosowaniem się członka personelu medycznego do wyników oceny analizowanego problemu medycznego uzyskanych przez sztuczną inteligencję.

Wątpliwości, które najprawdopodobniej szybko pojawią się w zakresie opiniowania sądowo-lekarskiego będą dotyczyły nie tylko uchwytnych biologicznie ujemnych skutków związanych z zastosowaniem sztucznej inteligencji w medycynie, ale także będą miały związek z naruszeniem praw pacjenta. Przykładowo, zgodnie z zapisami Ustawy o zawodzie lekarza i lekarza dentystry z dnia 5 grudnia 1996 roku, poza szczególnymi sytuacjami, przed wszczęciem postępowania diagnostyczno-terapeutycznego, w tym o charakterze zabiegowym, lekarz powinien dołożyć wszelkich starań, aby uniknąć rozszerzenia lub zmiany planowanego postępowania leczniczego w jego trakcie [62, 63]. Tym samym zgoda na określony rodzaj procedury nie jest automatycznie równoznaczna ze zgodą na wszelkie działania, nawet kiedy są one uzasadnione medycznie. W jaki sposób miałyby być w takiej sytuacji traktowane np. działanie autonomicznego robota chirurgicznego, który w oparciu o analizę obrazu śródoperacyjnego i bazy danych podjąłby decyzję o poszerzeniu zakresu leczenia operacyjnego ze wskazań medycznych. Kto w takiej sytuacji realnie miałby naruszyć prawa pacjenta: lekarz nadzorujący lub zlecający zabieg, autonomiczny robot, producent oprogramowania?

Nadanie nawet najbardziej zaawansowanej sztucznej inteligencji zdolności prawnej wymagałoby najprawdopodobniej także uwzględnienia jej roli w procesie legislacyjnym, czy też zrozumienia w oparciu o jakie kryteria oprogramowanie o tak wysokim stopniu autonomii będzie dążyło do realizacji celów lub założeń. Dlatego też, przynajmniej na chwilę obecną, nadal najrozsądniejszym kierunkiem postępowania jest traktowanie sztucznej inteligencji wyłącznie jako narzędzia pomocniczego osobie udzielającej świadczenia zdrowotnego, przy uwzględnieniu, że tylko i wyłącznie człowiek powinien podejmować ostateczne decyzje w zakresie wyboru metody diagnostycznej i/lub terapeutycznej oraz sposobu ich przeprowadzenia z poszanowaniem praw pacjenta. Tym samym w zakresie opiniowania sądowo-lekarskiego analiza problemu medycznego powinna nadal w pierwszej kolejności obejmować ocenę postępowania personelu medycznego z uwzględnieniem reguł ostrożności, należytej staranności, wskazań aktualnej wiedzy medycznej i zasad etycznych, a sztuczna inteligencja powinna być traktowana jako narzędzie pomocnicze.

## Conclusions

1. Dynamic development of computational power and the capability of artificial intelligence to analyze vast data volumes made it possible to transfer artificial intelligence methods to forensic medicine and related sciences.
2. Artificial intelligence has numerous applications in forensic medicine and related sciences and can be helpful in thanatology, forensic traumatology in post-mortem identification examinations, as well as in post-mortem microscopic and toxicological diagnostics.
3. Analyzing legal and forensic aspects, artificial intelligence in medicine should be treated as an auxiliary tool, whereas the final diagnostic and therapeutic decisions and the extent to which they are implemented should be the responsibility of humans.

## Wnioski

1. Dynamiczny rozwój mocy obliczeniowej oraz zdolność sztucznej inteligencji do analizy ogromnych ilości danych umożliwiły przeniesienie metod sztucznej inteligencji do medycyny sądowej i nauk pokrewnych.
2. Sztuczna inteligencja ma liczne zastosowania w medycynie sądowej oraz naukach pokrewnych i może być pomocna w tanatologii, traumatologii sądowo-lekarskiej, w pośmiertnych badaniach identyfikacyjnych, a także w pośmiertnej diagnostyce mikroskopowej i toksykologicznej.
3. Analizując aspekty prawne i medyczo-sądowe sztuczna inteligencja w medycynie powinna być traktowana jako narzędzie pomocnicze, natomiast ostateczne decyzje diagnostyczne i terapeutyczne oraz zakres ich realizacji powinien należeć do człowieka.

## References | Piśmiennictwo

1. Boden MA. Sztuczna Inteligencja. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2020; 1: 14.
2. Bosek L. Artykuł 6. w: Ustawa o prawach pacjenta i Rzeczniku Praw Pacjenta. Komentarz. Leszek Bosek (red.). Warszawa. 2020; 116-141.
3. Buchanan BG. A (Very) Brief History of Artificial Intelligence In: AI Magazine. 2005; 26(4): 53-60.
4. Baothman F. Artificial Intelligence Effects on Contracts and Contracting. Innovative and Agile Contracting for Digital Transformation and Industry 4.0. IGI Global, 2021; 149-160.
5. Salto-Tellez M, Maxwell P, Hamilton P. Artificial intelligence-the third revolution in pathology. *Histopathology* 2019; 74: 372-376.
6. Farabet C, Couprie C, Najman L, Lecun Y. Learning hierarchical features for scene labeling. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* 2013; 35(8): 1915-1929.
7. Kumar Y, Koul A, Singla R, Ijaz MF. Artificial intelligence in disease diagnosis: a systematic literature review, synthesizing framework and future research agenda. *J Ambient Intell Humaniz Comput.* 2023; 14(7): 8459-8486.
8. Piraianu A-I, Fulga A, Musat CL, Ciobotaru O-R, Poalelungi DG, Stamate E, Ciobotaru O, Fulga I. Enhancing the Evidence with Algorithms: How Artificial Intelligence Is Transforming Forensic Medicine. *Diagnostics.* 2023; 13(18): 2992
9. Lee SI, Celik S, Logsdon BA, Lundberg SM, Martins TJ, Oehler VG, Estey EH, Miller CP, Chien S, Dai J, Saxena A, Blau CA, Becker PS. A machine learning approach to integrate big data for precision medicine in acute myeloid leukemia. *Nat Commun.* 2018; 9(1): 42.
10. Bann S, Khan M, Hernandez J, Munz Y, Moorthy K, Datta V, Rockall T, Darzi A. Robotics in surgery. *J Am Coll Surg.* 2003; 196(5): 784-795.
11. Yang S, Zhu F, Ling X, Liu Q, Zhao P. Intelligent Health Care: Applications of Deep Learning in Computational Medicine. *Front Genet.* 2021;12: 607471.
12. Wang J, Teng C, Zhang Z, Chen W, Tan J, Pan Y, Zhang R, Zhou H, Ding B, Cheng HM, Liu B. A Scalable Artificial Neuron Based on Ultrathin Two-Dimensional Titanium Oxide. *ACS Nano.* 2021; 15(9): 15123-15131.
13. Emmert-Streib F, Yli-Harja O, Dehmer M. Explainable artificial intelligence and machine learning: A reality rooted perspective. *WIREs Data Mining Knowl Discov.* 2020; 10:e1368.
14. Angelov PP, Soares EA, Jiang R, Arnold NI, Atkinson PM. (Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery.* 2021; 11(5): e1424.
15. Stata R, Bharat K, Maghoul F. The Term Vector Database: fast access to indexing terms for Web pages, *Computer Networks,* 2000; 33(1-6): 247-255.
16. Parai JL, Milroy CM. Histological Aging of Bruising: A Historical and Ongoing Challenge. *Academic Forensic Pathology.* 2015; 5(2): 266-272.
17. Nash KR, Sheridan DJ. Can one accurately date a bruise? State of the science. *J Forensic Nurs.* 2009; 5(1): 31-37.
18. Ross CG, Langlois NEI, Heath K, Byard RW. Further evidence for a lack of reliability in the histologic ageing of bruises – an autopsy study. *Aust J Forensic Sci.* 2015; 47(2): 224-229.

19. Barington K, Jensen HE, Skovgaard K. Forensic aspects of gene expression signatures for age determination in bruises as evaluated in an experimental porcine model. *Forensic Sci Med Pathol.* 2017; 13(2): 151-160.
20. Hughes VK, Langlois NE. Use of reflectance spectrophotometry and colorimetry in a general linear model for the determination of the age of bruises. *Forensic Sci Med Pathol.* 2010; 6(4): 275-281.
21. Tirado J, Mauricio D. Bruise dating using deep learning. *J Forensic Sci.* 2021; 66: 336-346.
22. Jashnani KD, Kale SA, Rupani AB. Vitreous humor: biochemical constituents in estimation of postmortem interval. *J Forensic Sci.* 2010; 55(6): 1523-1527.
23. Madea B. Is there recent progress in the estimation of the postmortem interval by means of thanatochemistry? *Forensic Sci Int.* 2005; 151(2-3): 139-149.
24. Szeremeta M, Samczuk P, Pietrowska K, Kowalczyk T, Przeslaw K, Sieminska J, Kretowski A, Niemcunowicz-Janica A, Ciborowski M. In Vitro Animal Model for Estimating the Time since Death with Attention to Early Postmortem Stage. *Metabolites.* 2023; 13(1): 26.
25. Metcalf JL. Estimating the postmortem interval using microbes: Knowledge gaps and a path to technology adoption. *Forensic Sci Int Genet.* 2019; 38: 211-218.
26. Liu R, Gu Y, Shen M, Li H Zhang, K Wang, Q Wei, X Zhang, H Wu, D Yu, K Cai, W Wang, G Zhang, S Sun, Q Huang, P Wang Z. Predicting postmortem interval based on microbial community sequences and machine learning algorithms. *Environ Microbiol.* 2020; 22: 2273-2291.
27. Metcalf JL, Xu ZZ, Weiss S, Lax S, Van Treuren W, Hyde ER, Song SJ, Amir A, Larsen P, Sangwan N, Haarmann D, Humphrey GC, Ackermann G, Thompson LR, Lauber C, Bibat A, Nicholas C, Gebert MJ, Petrosino JF, Reed SC, Gilbert JA, Lynne AM, Bucheli SR, Carter DO, Knight R. Microbial community assembly and metabolic function during mammalian corpse decomposition. *Science* 2016; 351(6269): 158-162.
28. Wang Z, Zhang F, Wang L, Yuan H, Guan D, Zhao R. Advances in artificial intelligence-based microbiome for PMI estimation. *Front. Microbiol.* 2022; 13: 1034051.
29. Bukyya JL, Tejasvi MLA, Avinash A, P CH, Talwade P, Afroz MM, Pokala A, Neela PK, Shyamilee TK, Srisha V. DNA Profiling in Forensic Science: A Review. *Glob Med Genet.* 2021; 8(4): 135-143.
30. Cossellu G, De Luca S, Biagi R, Farronato G, Cingolani M, Ferrante L, Cameriere R. Reliability of frontal sinus by cone beam-computed tomography (CBCT) for individual identification. *Radiol med.* 2015; 120: 1130-1136.
31. Thurzo A, Kosnáčová HS, Kurilová V, Kosmeř S, Beňuš R, Moravský N, Kováč P, Kuracinová KM, Palkovič M, Varga I. Use of Advanced Artificial Intelligence in Forensic Medicine, Forensic Anthropology and Clinical Anatomy. *Healthcare.* 2021; 9(11): 1545.
32. Saini M, Kapoor AK. Biometrics in forensic identification: applications and challenges. *J Forensic Med.* 2016; 1:108.
33. Raszeja S. Badania histopatologiczne w opiniowaniu sądowo-lekarskim. *Arch Med Sadowej Kryminol.* 2007; 57(2): 180-183.
34. Fattori A, Arfeuille G, Parratte T, Gantzer J, Olagne J, Lannes B, Lhermitte B. Histopathological diagnosis of an intoxication. *Ann Pathol.* 2021; 41(6): 549-553.
35. Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, Schwartz LH, Aerts HJWL. Artificial intelligence in radiology. *Nature Reviews Cancer* 2018; 18(8): 500-510.
36. Chang H, Jung C, Woo JI, Lee S, Cho J, Kim SW, Kwak TY. Artificial Intelligence in Pathology. *Journal of pathology and translational medicine* 2019; 53(1): 1-12.
37. Rees-Channer RR, Bachman CM, Grignard L, Gatton ML, Burkot S, Horning MP, Delahunt CB, H L, Mehanian C, Thompson CM, Woods K, Lansdell, P, Shah S, Chiodini PL. Evaluation of an automated microscope using machine learning for the detection of malaria in travelers returned to the UK. *Front. Malar.* 2023; 1: 1148115.
38. Garland J, Hu M, Duffy M, Kesha K, Glenn C, Morrow P, Stables S, Ondruschka B, Da Broi U, Tse RD. Classifying Microscopic Acute and Old Myocardial Infarction Using Convolutional Neural Networks. *Am J Forensic Med Pathol.* 2021; 42(3): 230-234.
39. Badam RK, Sownetha T, Babu DBG, Waghay S, Reddy L, Garlapati K, Chavva S. Virtopsy: Touch-free autopsy. *J Forensic Dent Sci.* 2017; 9(1): 42.
40. Woźniak K, Rzepecka-Woźniak E, Moskała A, Pohl J, Latacz K, Dybała B. Weapon identification using antemortem computed tomography with virtual 3D and rapid prototype modeling--a report in a case of blunt force head injury. *Forensic Sci Int.* 2012; 222 (1-3): e29-32.
41. O'Sullivan S, Holzinger A, Zatloukal K, Saldiva P, Sajid MI, Wichmann D. Machine learning enhanced virtual autopsy. *Autops Case Rep.* 2017; 7: 3-7.
42. Bobbili R, Ramakrishna B, Madhu V. An Artificial Intelligence Model for Ballistic Performance of Thin Plates. *Mech. Based Des. Struct. Mach.* 2023; 51: 327-338.
43. Cheng W, Ng CA. Using Machine Learning to Classify Bioactivity for 3486 Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) from the OECD List. *Environ Sci Technol.* 2019; 53(23): 13970-13980.
44. McCoubrey LE, Elbadawi M, Orlu M, Gaisford S, Basit AW. Machine Learning Uncovers Adverse Drug Effects on Intestinal Bacteria. *Pharmaceutics.* 2021; 13(7): 1026.

45. Wang YW, Huang L, Jiang SW, Li K, Zou J, Yang SY. CapsCarcino: A novel sparse data deep learning tool for predicting carcinogens. *Food Chem Toxicol.* 2020; 135: 110921.
46. Karim A, Riahi V, Mishra A, Newton MAH, Dehjangi, A, Balle, T, Sattar A. Quantitative toxicity prediction via meta ensembling of multi-task deep learning models. *ACS Omega.* 2021; 6: 12306-12317.
47. Lin Z, Chou WC. Machine Learning and Artificial Intelligence in Toxicological Sciences. *Toxicol Sci.* 2022; 189(1): 7-19.
48. Boehme AK, Esenwa C, Elkind MS. Stroke Risk Factors, Genetics, and Prevention. *Circ Res.* 2017; 120(3): 472-495.
49. Sundaram AM, Budjakoski N, Klodmann J, Roa MA. Task-specific robot base pose optimization for robot-assisted surgeries. *Front Robot AI.* 2022; 9: 899646.
50. Ustawa z dnia 9.10.2015 r., o zmianie ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia oraz niektórych innych ustaw – art. 42 ust. 1 u.z.l. (Dz.U. z 2015 r., poz. 1991).
51. Art. 9 KEL, <https://nil.org.pl/dokumenty/kodeks-etyki-lekarskiej>
52. Rozporządzenie Ministra zdrowia z dnia 19.07.2022 r., w sprawie programu pilotażowego w zakresie wykorzystania opasek telemedycznych w podstawowej opiece zdrowotnej (Dz.U. z 2021 r., poz. 1328).
53. Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie programu pilotażowego w zakresie wykorzystania elektronicznych spirometrów w podstawowej opiece zdrowotnej i ambulatoryjnej opiece specjalistycznej z dnia 31.12.2021 r. (Dz.U. z 2022 r., poz. 121).
54. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 6.04.2020 r., zmieniające rozporządzenie w sprawie świadczeń gwarantowanych z zakresu ambulatoryjnej opieki specjalistycznej (Dz.U. z 2020 r., poz. 612).
55. Moschovas MC, Brady I, Jaber AR, Zeinab MA, Kaviani A, Kaouk J, Crivellaro S, Joseph J, Mottrie A, Patel V. Da Vinci SP radical prostatectomy: a multicentric collaboration and step-by-step techniques. *Int Braz J Urol.* 2022; 48(4): 728-729.
56. Uk Bae S. Current Status and Future of Robotic Surgery for Colorectal Cancer-An English Version. *J Anus Rectum Colon.* 2022; 6(4): 221-230.
57. Cui H, Liu GX, Deng H, Cao B, Zhang W, Liang WQ, Xie TY, Zhang QP, Wang N, Chen L, Wei B. [Comparison of short-term efficacy between robotic and 3D laparoscopic-assisted D2 radical distal gastrectomy for gastric cancer]. *Zhonghua Wei Chang Wai Ke Za Zhi.* 2020; 23(4): 350-356.
58. Da Col T, Caccianiga G, Catellani M, Mariani A, Ferro M, Cordima G, De Momi E, Ferrigno G, de Cobelli O. Automating Endoscope Motion in Robotic Surgery: A Usability Study on da Vinci-Assisted Ex Vivo Neobladder Reconstruction. *Front Robot AI.* 2021;8:707704.
59. Cheng Q, Dong Y. Da Vinci Robot-Assisted Video Image Processing under Artificial Intelligence Vision Processing Technology. *Comput Math Methods Med.* 2022; 2022: 2752444.
60. Art. 331 k.c. (Dz.U. z 2023 r. poz. 1610).
61. Art. 4491 § 2 k.c. (Dz.U. z 2023 r. poz. 1610).
62. Art. 34 Ustawa z dnia 5 grudnia 1996 r. o zawodach lekarza i lekarza dentysty (Dz.U. z 1997 r. nr 28 poz. 152).
63. Art. 35 Ustawa z dnia 5 grudnia 1996 r. o zawodach lekarza i lekarza dentysty (Dz.U. z 1997 r. nr 28 poz. 152).

**Date:**date of submission | data nadesłania: **23.02.2024**acceptance date | data akceptacji: **16.04.2024****Corresponding author:**

dr hab. Michał Szeremeta  
 Zakład Medycyny Sądowej  
 Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku  
 ul. Waszyngtona 13, 15-269 Białystok  
 e-mail: michalszeremeta@gmail.com

**ORCID:**

Michał Szeremeta: 0000-0001-5845-0053

Anna Niemcunowicz-Janica: 0000-0003-2807-8312