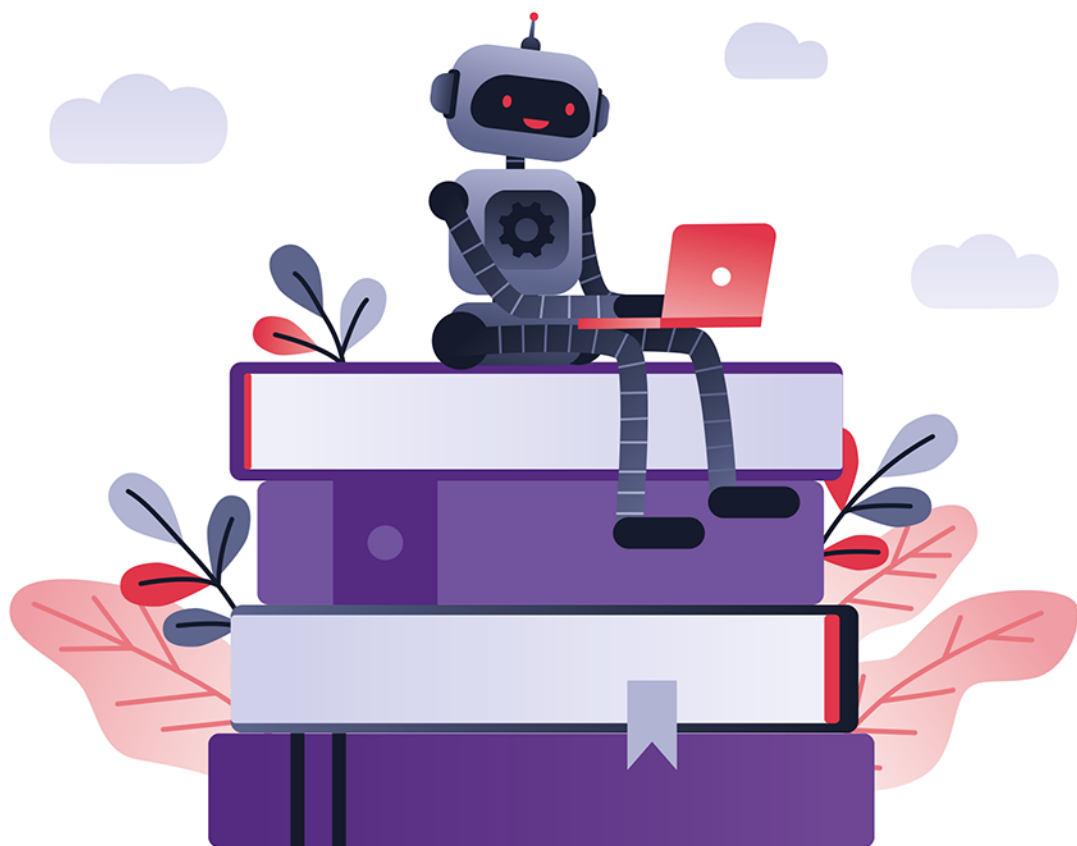


François Chollet

J.J. Allaire



# DEEP LEARNING

PRACA Z **JĘZYKIEM R** I BIBLIOTEKĄ **KERAS**

Helion 

Tytuł oryginału: Deep Learning with R

Tłumaczenie: Konrad Matuk

Projekt okładki: Studio Gravite / Olsztyn  
Obarek, Pokoński, Pazdrijowski, Zaprucki

Materiały graficzne na okładce zostały wykorzystane za zgodą Shutterstock Images LLC.

ISBN: 978-83-283-4780-9

Original edition copyright © 2018 by Manning Publications Co.  
All rights reserved.

Polish edition copyright © 2019 by HELION SA.  
All rights reserved.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz Helion SA dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz Helion SA nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Helion SA  
ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice  
tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63  
e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)  
WWW: <http://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Pliki z przykładami omawianymi w książce można znaleźć pod adresem:  
<ftp://ftp.helion.pl/przyklady/delerk.zip>

Drogi Czytelniku!  
Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres  
<http://helion.pl/user/opinie/delerk>  
Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

# Spis treści

Przedmowa	9
Podziękowania	11
O książce	13
O autorach	17
<b>CZĘŚĆ I. PODSTAWY UCZENIA GŁĘBOKIEGO .....</b>	<b>19</b>
<b>Rozdział 1. Czym jest uczenie głębokie?</b>	<b>21</b>
1.1. Sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe i uczenie głębokie	22
1.1.1. Sztuczna inteligencja	22
1.1.2. Uczenie maszynowe	22
1.1.3. Formy danych umożliwiające uczenie	24
1.1.4. „Głębia” uczenia głębokiego	26
1.1.5. Działanie uczenia głębokiego przedstawione na trzech rysunkach	27
1.1.6. Co dotychczas osiągnięto za pomocą uczenia głębokiego?	29
1.1.7. Nie wierz w tymczasową popularność	30
1.1.8. Nadzieje na powstanie sztucznej inteligencji	31
1.2. Zanim pojawiło się uczenie głębokie: krótka historia uczenia maszynowego	32
1.2.1. Modelowanie probabilistyczne	32
1.2.2. Wczesne sieci neuronowe	33
1.2.3. Metody jądrowe	33
1.2.4. Drzewa decyzyjne, lasy losowe i gradientowe wzmacnianie maszyn	35
1.2.5. Powrót do sieci neuronowych	35
1.2.6. Co wyróżnia uczenie głębokie?	36
1.2.7. Współczesne uczenie maszynowe	37
1.3. Dlaczego uczenie głębokie? Dlaczego teraz?	38
1.3.1. Sprzęt	38
1.3.2. Dane	39
1.3.3. Algorytmy	40
1.3.4. Nowa fala inwestycji	40
1.3.5. Demokratyzacja uczenia głębokiego	41
1.3.6. Co dalej?	41
<b>Rozdział 2. Matematyczne podstawy sieci neuronowych</b>	<b>43</b>
2.1. Pierwszy przykład sieci neuronowej	44
2.2. Reprezentacja danych sieci neuronowych	47
2.2.1. Skalary (tensory zerowymiarowe)	48
2.2.2. Wektory (tensory jednowymiarowe)	48
2.2.3. Macierze (tensory dwuwymiarowe)	48
2.2.4. Trójwymiarowe tensory i tensory o większej liczbie wymiarów	49

2.2.5.	<i>Główne atrybuty</i>	49
2.2.6.	<i>Obsługa tensorów R</i>	50
2.2.7.	<i>Wsad danych</i>	50
2.2.8.	<i>Prawdziwe przykłady tensorów danych</i>	51
2.2.9.	<i>Dane wektorowe</i>	51
2.2.10.	<i>Dane szeregu czasowego i dane sekwencyjne</i>	52
2.2.11.	<i>Dane w postaci obrazów</i>	52
2.2.12.	<i>Materiały wideo</i>	53
2.3.	<i>Koła zębate sieci neuronowych: operacje na tensorach</i>	53
2.3.1.	<i>Operacje wykonywane element po elemencie</i>	54
2.3.2.	<i>Operacje na tensorach o różnych wymiarach</i>	55
2.3.3.	<i>Iloczyn tensorowy</i>	55
2.3.4.	<i>Zmiana kształtu tensora</i>	57
2.3.5.	<i>Geometryczna interpretacja operacji tensorowych</i>	58
2.3.6.	<i>Interpretacja geometryczna uczenia głębokiego</i>	59
2.4.	<i>Silnik sieci neuronowych: optymalizacja gradientowa</i>	60
2.4.1.	<i>Czym jest pochodna?</i>	61
2.4.2.	<i>Pochodna operacji tensorowej: gradient</i>	62
2.4.3.	<i>Stochastyczny spadek wzdłuż gradientu</i>	63
2.4.4.	<i>Łączenie pochodnych: algorytm propagacji wstecznej</i>	66
2.5.	<i>Ponowna analiza pierwszego przykładu</i>	67
2.6.	<i>Podsumowanie rozdziału</i>	68

## **Rozdział 3. Rozpoczynamy korzystanie z sieci neuronowych** 71

3.1.	<i>Anatomia sieci neuronowej</i>	72
3.1.1.	<i>Warstwy: podstawowe bloki konstrukcyjne uczenia głębokiego</i>	72
3.1.2.	<i>Modele: sieci warstw</i>	73
3.1.3.	<i>Funkcja straty i optymalizatory: najważniejsze elementy konfiguracji procesu uczenia</i>	74
3.2.	<i>Wprowadzenie do pakietu Keras</i>	75
3.2.1.	<i>Keras, TensorFlow, Theano i CNTK</i>	76
3.2.2.	<i>Instalowanie pakietu Keras</i>	77
3.2.3.	<i>Praca z pakietem Keras: krótkie wprowadzenie</i>	77
3.3.	<i>Przygotowanie stacji roboczej do uczenia głębokiego</i>	79
3.3.1.	<i>Dwie opcje uruchamiania pakietu Keras</i>	79
3.3.2.	<i>Wady i zalety uruchamiania uczenia głębokiego w chmurze</i>	80
3.3.3.	<i>Jaki procesor graficzny najlepiej nadaje się do uczenia głębokiego?</i>	80
3.4.	<i>Przykład klasyfikacji binarnej: klasyfikacja recenzji filmów</i>	81
3.4.1.	<i>Zbiór danych IMDB</i>	81
3.4.2.	<i>Przygotowywanie danych</i>	82
3.4.3.	<i>Budowa sieci neuronowej</i>	83
3.4.4.	<i>Walidacja modelu</i>	87
3.4.5.	<i>Używanie wytrenowanej sieci do generowania przewidywań dotyczących nowych danych</i>	90
3.4.6.	<i>Dalsze eksperymenty</i>	90
3.4.7.	<i>Wnioski</i>	91
3.5.	<i>Przykład klasyfikacji wieloklasowej: klasyfikacja krótkich artykułów prasowych</i>	91
3.5.1.	<i>Zbiór danych Agencji Reutersa</i>	91
3.5.2.	<i>Przygotowywanie danych</i>	93

3.5.3.	<i>Budowanie sieci</i>	93
3.5.4.	<i>Walidacja modelu</i>	94
3.5.5.	<i>Generowanie przewidywań dotyczących nowych danych</i>	96
3.5.6.	<i>Inne sposoby obsługi etykiet i funkcji straty</i>	97
3.5.7.	<i>Dlaczego warto tworzyć odpowiednio duże warstwy pośrednie?</i>	97
3.5.8.	<i>Dalsze eksperymenty</i>	98
3.5.9.	<i>Wnioski</i>	98
3.6.	<b>Przykład regresji: przewidywanie cen mieszkań</b>	99
3.6.1.	<i>Zbiór cen mieszkań w Bostonie</i>	99
3.6.2.	<i>Przygotowywanie danych</i>	100
3.6.3.	<i>Budowanie sieci</i>	100
3.6.4.	<i>K-składowa walidacja krzyżowa</i>	101
3.6.5.	<i>Wnioski</i>	105
3.7.	<b>Podsumowanie rozdziału</b>	105
<b>Rozdział 4. Podstawy uczenia maszynowego</b>		<b>107</b>
4.1.	<b>Cztery rodzaje uczenia maszynowego</b>	108
4.1.1.	<i>Uczenie nadzorowane</i>	108
4.1.2.	<i>Uczenie nienadzorowane</i>	108
4.1.3.	<i>Uczenie częściowo nadzorowane</i>	109
4.1.4.	<i>Uczenie przez wzmacnianie</i>	109
4.2.	<b>Ocena modeli uczenia maszynowego</b>	109
4.2.1.	<i>Zbiory treningowe, walidacyjne i testowe</i>	111
4.2.2.	<i>Rzeczy, o których warto pamiętać</i>	114
4.3.	<b>Wstępna obróbka danych, przetwarzanie cech i uczenie cech</b>	114
4.3.1.	<i>Przygotowywanie danych do przetwarzania przez sieci neuronowe</i>	115
4.3.2.	<i>Przetwarzanie cech</i>	116
4.4.	<b>Nadmierne dopasowanie i zbyt słabe dopasowanie</b>	118
4.4.1.	<i>Redukcja rozmiaru sieci</i>	119
4.4.2.	<i>Dodawanie regularyzacji wag</i>	121
4.4.3.	<i>Porzucanie — technika dropout</i>	123
4.5.	<b>Uniwersalny przepływ roboczy uczenia maszynowego</b>	125
4.5.1.	<i>Definiowanie problemu i przygotowywanie zbioru danych</i>	125
4.5.2.	<i>Wybór miary sukcesu</i>	126
4.5.3.	<i>Określanie techniki oceny wydajności modelu</i>	127
4.5.4.	<i>Przygotowywanie danych</i>	127
4.5.5.	<i>Tworzenie modeli lepszych od linii bazowej</i>	128
4.5.6.	<i>Skalowanie w górę: tworzenie modelu, który ulega nadmiernemu dopasowaniu</i>	129
4.5.7.	<i>Regularyzacja modelu i dostrajanie jego hiperparametrów</i>	129
4.6.	<b>Podsumowanie rozdziału</b>	130
<b>CZĘŚĆ II. UCZENIE GŁĘBOKIE W PRAKTYCE .....</b>		<b>131</b>
<b>Rozdział 5. Uczenie głębokie i przetwarzanie obrazu</b>		<b>133</b>
5.1.	<b>Wprowadzenie do konwolucyjnych sieci neuronowych</b>	134
5.1.1.	<i>Działanie sieci konwolucyjnej</i>	136
5.1.2.	<i>Operacja max-pooling</i>	141

5.2.	Trenowanie konwolucyjnej sieci neuronowej na małym zbiorze danych	143
5.2.1.	<i>Stosowanie uczenia głębokiego w problemach małych zbiorów danych</i>	144
5.2.2.	<i>Pobieranie danych</i>	144
5.2.3.	<i>Budowa sieci neuronowej</i>	147
5.2.4.	<i>Wstępna obróbka danych</i>	148
5.2.5.	<i>Stosowanie techniki augmentacji danych</i>	151
5.3.	Korzystanie z wcześniej wytrenowanej konwolucyjnej sieci neuronowej	155
5.3.1.	<i>Ekstrakcja cech</i>	155
5.3.2.	<i>Dostrajanie</i>	163
5.3.3.	<i>Wnioski</i>	167
5.4.	Wizualizacja efektów uczenia konwolucyjnych sieci neuronowych	168
5.4.1.	<i>Wizualizacja pośrednich aktywacji</i>	169
5.4.2.	<i>Wizualizacja filtrów konwolucyjnych sieci neuronowych</i>	175
5.4.3.	<i>Wizualizacja map ciepła aktywacji klas</i>	181
5.5.	Podsumowanie rozdziału	185
<b>Rozdział 6. Uczenie głębokie w przetwarzaniu tekstu i sekwencji</b>		<b>187</b>
6.1.	Praca z danymi tekstowymi	188
6.1.1.	<i>Kodowanie słów i znaków metodą gorącej jedynki</i>	189
6.1.2.	<i>Osadzanie słów</i>	192
6.1.3.	<i>Łączenie wszystkich technik: od surowego tekstu do osadzenia słów</i>	197
6.1.4.	<i>Wnioski</i>	203
6.2.	Rekurencyjne sieci neuronowe	203
6.2.1.	<i>Warstwa rekurencyjna w pakiecie Keras</i>	206
6.2.2.	<i>Warstwy LSTM i GRU</i>	209
6.2.3.	<i>Przykład warstwy LSTM zaimplementowanej w pakiecie Keras</i>	212
6.2.4.	<i>Wnioski</i>	213
6.3.	Zaawansowane zastosowania rekurencyjnych sieci neuronowych	214
6.3.1.	<i>Problem prognozowania temperatury</i>	214
6.3.2.	<i>Przygotowywanie danych</i>	217
6.3.3.	<i>Punkt odniesienia w postaci zdrowego rozsądku</i>	220
6.3.4.	<i>Podstawowe rozwiązanie problemu przy użyciu techniki uczenia maszynowego</i>	221
6.3.5.	<i>Punkt odniesienia w postaci pierwszego modelu rekurencyjnego</i>	223
6.3.6.	<i>Stosowanie rekurencyjnego porzucania w celu zmniejszenia nadmiernego dopasowania</i>	225
6.3.7.	<i>Tworzenie stosów warstw rekurencyjnych</i>	226
6.3.8.	<i>Korzystanie z dwukierunkowych rekurencyjnych sieci neuronowych</i>	228
6.3.9.	<i>Kolejne rozwiązania</i>	232
6.3.10.	<i>Wnioski</i>	233
6.4.	Konwolucyjne sieci neuronowe i przetwarzanie sekwencji	234
6.4.1.	<i>Przetwarzanie sekwencji za pomocą jednowymiarowej sieci konwolucyjnej</i>	234
6.4.2.	<i>Jednowymiarowe łączenie danych sekwencyjnych</i>	235
6.4.3.	<i>Implementacja jednowymiarowej sieci konwolucyjnej</i>	235
6.4.4.	<i>Łączenie sieci konwolucyjnych i rekurencyjnych w celu przetworzenia długich sekwencji</i>	237
6.4.5.	<i>Wnioski</i>	241
6.5.	Podsumowanie rozdziału	242

<b>Rozdział 7. Najlepsze zaawansowane praktyki uczenia głębokiego</b>	<b>245</b>
7.1. Funkcjonalny interfejs programistyczny pakietu Keras: wykraczanie poza model sekwencyjny	246
7.1.1. Wprowadzenie do funkcjonalnego interfejsu API	247
7.1.2. Modele z wieloma wejściami	249
7.1.3. Modele z wieloma wyjściami	251
7.1.4. Skierowane acykliczne grafy warstw	254
7.1.5. Udostępnianie wag warstwy	258
7.1.6. Modele pełniące funkcję warstw	259
7.1.7. Wnioski	260
7.2. Monitorowanie modeli uczenia głębokiego przy użyciu wywołań zwrotnych pakietu Keras i narzędzia TensorBoard	260
7.2.1. Używanie wywołań zwrotnych w celu sterowania procesem trenowania modelu	260
7.2.2. Wprowadzenie do TensorBoard — platformy wizualizacji danych pakietu TensorFlow	264
7.2.3. Wnioski	268
7.3. Korzystanie z pełni możliwości modeli	268
7.3.1. Konstrukcja zaawansowanych architektur	269
7.3.2. Optymalizacja hiperparametru	272
7.3.3. Składanie modeli	274
7.3.4. Wnioski	276
7.4. Podsumowanie rozdziału	276
<b>Rozdział 8. Stosowanie uczenia głębokiego w celu generowania danych</b>	<b>279</b>
8.1. Generowanie tekstu za pomocą sieci LSTM	281
8.1.1. Krótka historia generatywnych sieci rekurencyjnych	281
8.1.2. Generowanie danych sekwencyjnych	282
8.1.3. Dlaczego strategia próbkowania jest ważna?	282
8.1.4. Implementacja algorytmu LSTM generującego tekst na poziomie liter	285
8.1.5. Wnioski	289
8.2. DeepDream	290
8.2.1. Implementacja algorytmu DeepDream w pakiecie Keras	291
8.2.2. Wnioski	296
8.3. Neuronowy transfer stylu	297
8.3.1. Strata treści	298
8.3.2. Strata stylu	298
8.3.3. Implementacja neuronowego transferu stylu przy użyciu pakietu Keras	299
8.3.4. Wnioski	304
8.4. Generowanie obrazów przy użyciu wariacyjnych autoenkoderów	306
8.4.1. Próbkowanie z niejawnej przestrzeni obrazów	306
8.4.2. Wektory koncepcyjne używane podczas edycji obrazu	307
8.4.3. Wariacyjne autoenkodery	308
8.4.4. Wnioski	314
8.5. Wprowadzenie do generatywnych sieci z przeciwnikiem	315
8.5.1. Schematyczna implementacja sieci GAN	316
8.5.2. Zbiór przydatnych rozwiązań	317
8.5.3. Generator	318

8.5.4.	<i>Dyskryminator</i>	319
8.5.5.	<i>Sieć z przeciwnikiem</i>	320
8.5.6.	<i>Trenowanie sieci DCGAN</i>	320
8.5.7.	<i>Wnioski</i>	322
8.6.	<i>Podsumowanie rozdziału</i>	323
<b>Rozdział 9. Wnioski</b>		<b>325</b>
9.1.	<i>Przypomnienie najważniejszych koncepcji</i>	326
9.1.1.	<i>Sztuczna inteligencja</i>	326
9.1.2.	<i>Co sprawia, że uczenie głębokie to wyjątkowa dziedzina uczenia maszynowego?</i>	326
9.1.3.	<i>Jak należy traktować uczenie głębokie?</i>	327
9.1.4.	<i>Najważniejsze technologie</i>	328
9.1.5.	<i>Uniwersalny przepływ roboczy uczenia maszynowego</i>	329
9.1.6.	<i>Najważniejsze architektury sieci</i>	330
9.1.7.	<i>Przestrzeń możliwości</i>	334
9.2.	<i>Ograniczenia uczenia głębokiego</i>	336
9.2.1.	<i>Ryzyko antropomorfizacji modeli uczenia maszynowego</i>	337
9.2.2.	<i>Lokalne uogólnianie a ekstremalne uogólnianie</i>	339
9.2.3.	<i>Wnioski</i>	340
9.3.	<i>Przyszłość uczenia głębokiego</i>	341
9.3.1.	<i>Modele jako programy</i>	342
9.3.2.	<i>Wykraczanie poza algorytm propagacji wstecznej i warstwy różniczkowalne</i>	343
9.3.3.	<i>Zautomatyzowane uczenie maszynowe</i>	344
9.3.4.	<i>Nieustanne uczenie się i wielokrotne używanie modułowych procedur składowych</i>	345
9.3.5.	<i>Przewidywania dotyczące dalekiej przyszłości</i>	346
9.4.	<i>Bycie na bieżąco z nowościami związanymi z szybko rozwijającą się dziedziną</i>	348
9.4.1.	<i>Zdobytaj wiedzę praktyczną, pracując z prawdziwymi problemami przedstawianymi w serwisie Kaggle</i>	348
9.4.2.	<i>Czytaj o nowych rozwiązaniach w serwisie arXiv</i>	348
9.4.3.	<i>Eksploruj ekosystem związany z pakietem Keras</i>	349
9.5.	<i>Ostatnie słowa</i>	349
<b>DODATKI .....</b>		<b>351</b>
<i>Dodatek A. Instalowanie pakietu Keras i innych bibliotek niezbędnych do jego działania w systemie Ubuntu</i>		353
<i>Dodatek B. Uruchamianie kodu w środowisku RStudio Server przy użyciu zdalnej instancji procesora graficznego EC2</i>		359
<i>Skorowidz</i>		365



# Stosowanie uczenia głębokiego w celu generowania danych

---

## **W tym rozdziale opisałem:**

- Generowanie tekstu za pomocą sieci LSTM.
- Implementację narzędzia DeepDream.
- Wykonywanie transferu neuronowego.
- Wariacyjne autoenkodery.
- Generatywne sieci z przeciwnikiem.

Potencjał udawania przez sztuczną inteligencję ludzkiego procesu myślowego wykracza poza pasywne zadania, takie jak rozpoznawanie obiektów, i zadania reakcyjne, takie jak prowadzenie samochodu. Sięga on również do zadań kreatywnych. Kilka lat temu nie wierzono mi, że w niedalekiej przyszłości większość naszej kultury będzie tworzona ze znaczną pomocą sztucznej inteligencji. Nie wierzyły mi nawet osoby od dłuższego czasu zajmujące się uczeniem maszynowym. Prognozę tę sformułowałem w 2014 r. Trzy lata później liczba niedowiarków zaczęła coraz szybciej maleć. Latem 2015 r. zobaczyliśmy efekty pracy algorytmu DeepDream opracowanego przez firmę Google, który bawił nas psychodelicznym obrazem psich oczu i paranoidalnych artefaktów. W 2016 r. pojawiła się aplikacja Prisma zamieniająca zdjęcia w obrazy o różnych stylach. Latem 2016 r. powstał eksperymentalny film krótkometrażowy *Sunspring*, stworzony na podstawie

scenariusza napisanego w pełni (łącznie z dialogami) przez algorytm LSTM. Coraz częściej sieci neuronowe stosuje się do komponowania muzyki.

Oczywiście dzieła tworzone obecnie przez sztuczną inteligencję nie są najwyższych lotów. Sztuczna inteligencja nie potrafi jeszcze zbliżyć się do poziomu ludzi pracujących jako scenarzyści, malarze i kompozytorzy. Zastępowanie ludzi nigdy nie było celem sztucznej inteligencji — nie chcemy zastąpić własnej inteligencji czymś innym, chcemy wnieść do naszego życia i naszej pracy *więcej* inteligentnych rozwiązań. W wielu zadaniach, a szczególnie w zadaniach kreatywnych, sztuczna inteligencja będzie używana w charakterze narzędzia *wspierającego* — będzie raczej nas wspierać, niż zastępować.

Tworzenie dzieła przez artystę w dużej mierze sprowadza się do prostego rozpoznawania wzorców i umiejętności technicznych. Te części procesu twórczego wiele osób uważa za mniej atrakcyjne. Tu właśnie wkracza sztuczna inteligencja. Nasz język i nasza sztuka charakteryzują się statystyczną strukturą. Algorytmy uczenia głębokiego mogą uczyć się takich właśnie struktur. Modele uczenia maszynowego mogą uczyć się **ukrytej przestrzeni** obrazów, muzyki i opowiadań. Następnie mogą generować *próbki* z tych przestrzeni w celu stworzenia nowego dzieła sztuki o charakterze podobnym do tego, co model rozpoznał w treningowym zbiorze danych. Oczywiście takie próbkowanie samo w sobie nie jest niczym kreatywnym. To tylko operacja matematyczna: algorytm nie ma pojęcia o ludzkim życiu, ludzkich emocjach i naszym doświadczeniu świata. Algorytm uczy się z doświadczeń, które bardzo różnią się od naszych. Znaczenie temu, co zostanie wygenerowane przez model, może nadać tylko interpretacja przez człowieka. Dane wygenerowane przez algorytm w rękach uzdolnionego artysty mogą zostać odpowiednio zmodyfikowane i nabrać piękna. Próbkowanie przestrzeni może stać się pędzlem wspomagającym artystę, modyfikować naszą kreatywność i poszerzać wyobraźnię. Algorytmy mogą sprawić, że tworzeniem sztuki zaczną zajmować się szersza grupa osób, ponieważ sztuczna inteligencja eliminuje potrzebę posiadania doświadczenia i umiejętności technicznych — oddziela ekspresję artystyczną od warsztatu.

Iannis Xenakis — wizjoner i pionier muzyki elektronicznej i algorytmicznej, wyraził tę samą myśl w latach 60. w kontekście stosowania automatycznych technologii w komponowaniu muzyki<sup>1</sup>.

*Kompozytor zwolniony z obowiązku wykonywania skrupulatnych obliczeń może poświęcić się pracy nad ogólnymi problemami nowej formy muzycznej i przyglądać się uważnie wszelkim szczegółom tej formy, modyfikując wartości danych wejściowych. Może np. sprawdzić wszystkie kombinacje instrumentalne: od solistów, przez małe orkiestry, do dużych orkiestr. Dzięki pomocy komputerów kompozytor zaczyna działać jak pilot: naciska przyciski, wprowadza współrzędne i nadzoruje trajektorię lotu kosmicznej kapsuły dźwięku przez muzyczne konstelacje i galaktyki, które do niedawna mógł sobie tylko wyobrazić.*

W tym rozdziale opiszę różne potencjalne zastosowania uczenia głębokiego w celach twórczych. Przedstawię zagadnienia związane z sekwencyjnym generowaniem danych (techniki przydatne podczas tworzenia tekstu lub muzyki), algorytmem DeepDream, tworzeniem obrazów przy użyciu wariacyjnych autoenkoderów i generatywnych sieci

---

<sup>1</sup> Iannis Xenakis, *Musiques formelles: nouveaux principes formels de composition musicale*, specjalne wydanie „La Revue musicale”, numery 253 – 254, 1963.

z przeciwnikiem. Podczas lektury tego rozdziału dowiesz się, jak sprawić, aby Twój komputer wygenerował nowe treści, i zaczniesz dostrzegać fantastyczne możliwości wynikające z łączenia techniki ze sztuką.

## 8.1. Generowanie tekstu za pomocą sieci LSTM

W tym podrozdziale opiszę stosowanie rekurencyjnych sieci neuronowych do generowania danych sekwencyjnych. Zrobię to na przykładzie generowania tekstu, ale to samo rozwiązanie może zostać użyte w celu utworzenia dowolnych danych o charakterze sekwencyjnym, takich jak sekwencje dźwięków tworzących muzykę i ruchy pędzlem tworzące obraz (dane tego typu można uzyskać, nagrywając tabletem ruchy dłoni artysty).

Możliwości generowania danych sekwencyjnych nie ograniczają się do tworzenia sztuki. Techniki tego typu stosuje się w syntezowaniu mowy i generowaniu wypowiedzi czatbotów. Udostępniona w 2016 r. przez firmę Google funkcja inteligentnej odpowiedzi, która może automatycznie wygenerować listę szybkich odpowiedzi na e-maile lub wiadomości tekstowe, jest oparta na podobnej technice.

### 8.1.1. Krótka historia generatywnych sieci rekurencyjnych

Pod koniec 2014 r. mało kto miał do czynienia z sieciami LSTM. Dotyczyło to nawet osób zajmujących się zawodowo uczeniem maszynowym. Skuteczne generowanie danych sekwencyjnych przy użyciu rekurencyjnych sieci neuronowych zaczęło być popularne dopiero w 2016 r. Pomimo tego techniki te mają dość długą historię — za jej początek można uznać opracowanie algorytmu LSTM w 1997 r.<sup>2</sup>. Początkowo algorytm ten stosowano do generowania tekstu znak po znaku.

W 2002 r. Douglas Eck, pracując wówczas w szwajcarskim laboratorium Schmidhubera, zastosował po raz pierwszy algorytm LSTM w celu wygenerowania muzyki. Udało mu się uzyskać obiecujące rezultaty. Eck jest obecnie badaczem w Google Brain, gdzie w 2016 r. założył zespół badawczy Magenta zajmujący się stosowaniem nowoczesnych technik uczenia głębokiego w celu tworzenia chwytliwej muzyki. Jak widać, wdrożenie pomysłu może czasami trwać nawet 15 lat.

Pod koniec lat dwutysięcznych i na początku drugiej dekady XXI w. Alex Graves stał się pionierem stosowania rekurencyjnych sieci neuronowych w celu generowania sekwencyjnych danych. Za punkt zwrotny rozwoju tej techniki uważa się napisanie przez niego pracy na temat stosowania różnych gęstych rekurencyjnych sieci w celu wygenerowania pisma odręcznego przy użyciu danych szeregu czasowego określających położenie długopisu<sup>3</sup>. Właśnie to zastosowanie sieci neuronowych było dla mnie urzeczywistnieniem idei *śniącej maszyny* i stanowiło duże źródło inspiracji, gdy rozpoczynałem pracę nad pakietem Keras. Graves miał podobne spostrzeżenia na ten temat. Świadczy o tym treść komentarza ukrytego w pliku LaTeX, załadowanego na serwer

---

<sup>2</sup> Sepp Hochreiter i Jürgen Schmidhuber, *Long Short-Term Memory*, „Neural Computation” 9, nr 8, 1997.

<sup>3</sup> Alex Graves, *Generating Sequences With Recurrent Neural Networks*, arXiv, 2013, <https://arxiv.org/abs/1308.0850>.

arXiv jako wstępna wersja artykułu: „Generowanie danych sekwencyjnych jest czymś, co maksymalnie zbliża komputery do śnienia”. Po upływie kilku lat niektóre z wówczas nowatorskich rozwiązań traktujemy jako coś zwykłego, ale w tamtych czasach trudno było przyglądać się temu, co pokazywał Graves, i nie być oszłomionym ilością nowych możliwości.

Od tego czasu rekurencyjne sieci neuronowe zaczęły być skutecznie stosowane w celu generowania muzyki, obrazów, treści dialogów, syntezy mowy i projektowania molekuł. Użyto ich nawet do wygenerowania scenariusza filmu, który został zrealizowany z udziałem prawdziwej obsady.

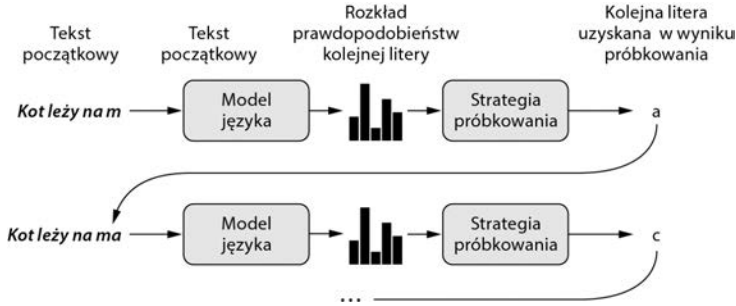
### 8.1.2. Generowanie danych sekwencyjnych

Uniwersalnym sposobem generowania danych sekwencyjnych przy użyciu uczenia głębokiego jest trenowanie sieci (zwykle sieci rekurencyjnej lub konwolucyjnej) w celu przewidywania kolejnego znaku lub kilku kolejnych znaków wchodzących w skład sekwencji na podstawie wcześniejszych znaków pełniących funkcję danych wejściowych. Przykładowo, fraza wejściowa „kot leży na maci” sprawi, że wytrenowana do przewidywania sieć wygeneruje literę „e” jako kolejną literę tej frazy. Pracując z danymi tekstowymi, możemy operować na tokenach mających formę słów lub znaków. Sieć mogąca modelować prawdopodobieństwo kolejnego tokena na podstawie poprzednich tokenów określamy mianem **modelu języka**. Model języka rozpoznaje **ukrytą przestrzeń** języka — jego strukturę statystyczną.

Po wytrenowaniu modelu języka możemy go używać w celu tworzenia **próbek** (generowania nowych sekwencji): do modelu kierowany jest początkowy łańcuch znaków (nazywa się go **danymi warunkującymi**), a model ma wygenerować kolejną literę lub kolejne słowo (możliwe jest nawet jednoczesne generowanie kilku tokenów). Wygenerowane dane wyjściowe są dodawane do danych wejściowych, a cały proces jest powtarzany wielokrotnie (patrz rysunek 8.1). Pętla ta pozwala na generowanie sekwencji o dowolnej długości. Charakter tych sekwencji odzwierciedla strukturę danych, na których model został wytrenowany — sekwencje wyglądają **prawie** tak, jakby zostały napisane przez człowieka. W tej sekcji zaprezentuję przykład, w którym warstwa LSTM na podstawie łańcuchów  $N$  znaków wyciągniętych z korpusu tekstu ma przewidywać znak  $N + 1$ . Na wyjściu modelu będzie znajdować się warstwa softmax określająca prawdopodobieństwa wszystkich liter na umieszczenie w charakterze kolejnego znaku. Warstwa LSTM, z której będę korzystać, określana jest mianem **modelu języka na poziomie liter**.

### 8.1.3. Dlaczego strategia próbkowania jest ważna?

Podczas generowania tekstu bardzo ważny jest sposób wyboru kolejnego znaku. Naiwną techniką wyboru kolejnego znaku jest tzw. **chciwe próbkowanie** (ang. *greedy sampling*) — zawsze wybierany jest znak o najwyższym prawdopodobieństwie. W praktyce zastosowanie tej techniki prowadzi do uzyskania powtarzalnych, przewidywalnych łańcuchów, które nie wyglądają naturalnie. Lepszym rozwiązaniem, dokonującym mniej oczywistych wyborów, jest proces próbkowania korzystający z mechanizmu losowania



**Rysunek 8.1.** Proces generowania tekstu znak po znaku przy użyciu modelu języka

wybierającego kolejne znaki na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa. Określamy je mianem **próbkowania stochastycznego** (przymiotnik **stochastyczny** w tym kontekście oznacza to samo co przymiotnik **losowy**). Po zastosowaniu tej techniki, jeżeli litera „e” charakteryzowała się prawdopodobieństwem wybrania jako kolejny znak na poziomie równym 0,3, litera ta będzie wybierana w 30% sytuacji. Zwróć uwagę na to, że próbkowanie chciwe może być również rzutowane na rozkład prawdopodobieństwa. Wówczas jeden znak będzie charakteryzował się prawdopodobieństwem równym 1, a pozostałe znaki będą miały zerowe wartości prawdopodobieństwa.

Probabilistyczne próbkowanie wyjściowe z warstwy softmax modelu jest dobrym rozwiązaniem, ponieważ pozwala na pojawienie się czasem nawet mniej prawdopodobnych znaków, co umożliwi uzyskanie bardziej interesujących zdań i wykazanie pewnej kreatywności poprzez tworzenie nowych realistycznie brzmiących słów, które nie wystąpiły w treningowym zbiorze danych. Strategia ta ma jedną wadę: nie oferuje żadnego sposobu *kontrolowania tego, jak bardzo losowy* jest proces próbkowania.

Dlaczego mielibyśmy chcieć zwiększać lub zmniejszać losowość? Przyjrzyjmy się ekstremalnemu przykładowi próbkowania o charakterze czysto losowym (kolejny znak jest wybierany z jednolitego rozkładu prawdopodobieństw — każda litera charakteryzuje się taką samą wartością prawdopodobieństwa). To najbardziej losowy scenariusz — rozkład prawdopodobieństwa charakteryzuje się maksymalną entropią. Oczywiście nie doprowadzi on do uzyskania niczego ciekawego. Z drugiej strony inny ekstremalny przypadek — próbkowanie chciwe — również nie przyczynia się do wygenerowania niczego ciekawego (nie ma tutaj żadnej losowości, a rozkład prawdopodobieństwa charakteryzuje się minimalną entropią). Próbkowanie z „realnego” rozkładu prawdopodobieństwa (rozkład generowany na wyjściu modelu przez funkcję softmax) stanowi rozwiązanie pośrednie, leży dokładnie na środku między dwoma zaprezentowanymi ekstremami. Oczywiście istnieje wiele innych punktów pośrednich (o wyższej lub niższej entropii), którym warto się przyjrzeć. Zmniejszenie entropii sprawi, że wygenerowane struktury będą charakteryzowały się bardziej przewidywalną strukturą, a więc potencjalnie mogą wyglądać bardziej realistycznie. Zmniejszanie entropii sprawi, że uzyskamy bardziej zaskakujące i kreatywne sekwencje. Gdy wykonuje się operację próbkowania z generatywnych modeli, zawsze warto sprawdzić wpływ różnej ilości czynnika losowego na proces generowania. Ostatecznie to my (ludzie) oceniamy to, jak bardzo interesujące są wygenerowane dane, a więc jest to bardzo subiektywne i nie można z góry ocenić optymalnego poziomu entropii.

W celu kontrolowania tego, jak bardzo losowy jest charakter procesu losowania, wprowadzimy parametr określany mianem **temperatury softmax**. Parametr ten charakteryzuje entropię rozkładu prawdopodobieństwa używanego podczas próbkowania — określa to, jak bardzo zaskakujące lub przewidywalne będą wybory kolejnych liter. Na podstawie wartości temperatury (temperature) poprzez zmiany wag obliczany jest nowy rozkład prawdopodobieństwa (przetwarzamy rozkład poprzedni wygenerowany przez warstwę wyjściową softmax modelu). Proces ten przebiega w następujący sposób:

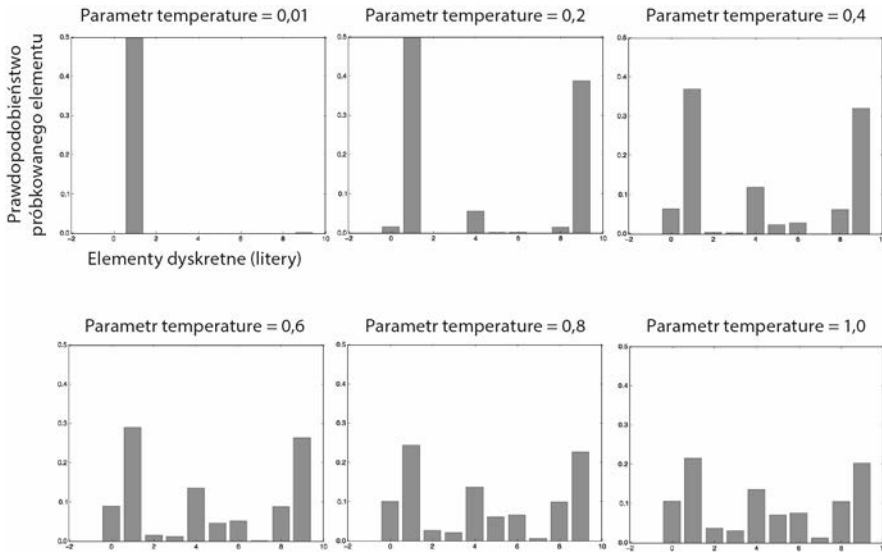
**Listing 8.1. Zmiany wag rozkładu prawdopodobieństwa w celu uzyskania innej temperatury softmax**

**Rozkład original\_distribution jest jednowymiarowym wektorem zawierającym wartości prawdopodobieństwa, których suma jest równa 1. Współczynnik temperature określa entropię rozkładu wyjściowego.**

```
reweight_distribution <- function(original_distribution,
                                temperature = 0.5) {
  distribution <- log(original_distribution) / temperature
  distribution <- exp(distribution)
  distribution / sum(distribution)
}
```

Zwracana jest zmodyfikowana wersja rozkładu. Suma wartości poszczególnych prawdopodobieństw nie musi być równa 1, a więc w celu uzyskania prawidłowych wartości należy przeprowadzić operację dzielenia wartości przez ich sumę.

Większe wartości parametru temperature prowadzą do uzyskania rozkładu próbkowania o wyższej entropii, a więc generowane będą bardziej zaskakujące dane. Mniejsze wartości tego parametru zmniejszają losowość i pozwalają na uzyskanie bardziej przewidywalnych danych (patrz rysunek 8.2).



**Rysunek 8.2.** Ten sam rozkład prawdopodobieństwa z różnymi wagami; zmniejszenie parametru temperature powoduje większą przewidywalność; zwiększenie parametru temperature zwiększa losowość

### 8.1.4. Implementacja algorytmu LSTM generującego tekst na poziomie liter

Czas skorzystać z pakietu Keras i zastosować teorię w praktyce. Na początek będziemy potrzebować dużo danych tekstowych do trenowania modelu języka. Możemy skorzystać z dowolnego wystarczająco rozbudowanego zestawu plików tekstowych — Wikipedii, *Władcy pierścieni* itd. W zaprezentowanym przykładzie posłużymy się wybranymi dziełami Friedricha Nietzschego — niemieckiego filozofa żyjącego w XIX w. — przetłumaczonymi na język angielski. W związku z tym wytrenujemy model odwzorowujący specyficzny styl pisania Nietzschego. Ponadto model ten będzie generował teksty tylko na wybrane tematy — nie będzie to ogólny model języka angielskiego.

#### PRZYGOTOWANIE DANYCH

Zacznijmy od pobrania korpusu i zapisania go przy użyciu tylko małych liter.

##### Listing 8.2. Pobieranie i parsowanie pliku tekstowego

```
library(keras)
library(stringr)

path <- get_file(
  "nietzsche.txt",
  origin = "https://s3.amazonaws.com/text-datasets/nietzsche.txt"
)
text <- tolower(readChar(path, file.info(path)$size))
cat("Długość korpusu:", nchar(text), "\n")
```

Teraz dokonamy wyodrębnienia częściowo zachodzących na siebie sekwencji o długości `maxlen`, zakodujemy je techniką kodowania z gorącą jedyneką, a następnie umieścimy je w trójwymiarowej tablicy o kształcie `x` (sequences, maxlen, unique\_characters). Jednocześnie przygotujemy tablicę `y` zawierającą „wartości docelowe”, które w tym przypadku są po prostu literami umieszczanymi po każdej z wyodrębnionych sekwencji. Wartości te zostaną zapisane przy użyciu techniki kodowania z gorącą jedyneką.

##### Listing 8.3. Zapis sekwencji liter za pomocą wektorów

```
maxlen <- 60 ← Wyodrębniamy sekwencje składające się z 60 znaków.

step <- 3 ← Nowa sekwencja jest próbkowana co 3 znaki.

text_indexes <- seq(1, nchar(text) - maxlen, by = step)
sentences <- str_sub(text, text_indexes, text_indexes + maxlen - 1)
next_chars <- str_sub(text, text_indexes + maxlen, text_indexes + maxlen)

cat("Liczba sekwencji: ", length(sentences), "\n")

chars <- unique(sort(strsplit(text, "")[[1]]))
cat("Liczba unikatowych znaków:", length(chars), "\n")
char_indices <- 1:length(chars)
names(char_indices) <- chars
```

Zmienna, w której zapisywane będą wyodrębnione sekwencje.

Zmienna, w której zapisywane będą kolejne znaki (cele).

Lista unikatowych znaków wchodzących w skład korpusu.

Słownik przypisujący unikatowe znaki do ich indeksów.

```

cat("Tworzenie wektorów...\n")
x <- array(0L, dim = c(length(sentences), maxlen, length(chars)))
y <- array(0L, dim = c(length(sentences), length(chars)))
for (i in 1:length(sentences)) {
  sentence <- strsplit(sentences[[i]], "")[[1]]
  for (t in 1:length(sentence)) {
    char <- sentence[[t]]
    x[i, t, char_indices[[char]]] <- 1
  }
  next_char <- next_chars[[i]]
  y[i, char_indices[[next_char]]] <- 1
}

```

Znaki są zapisywane w formie tablic binarnych przy użyciu kodowania z gorącą jedynką.

## BUDOWANIE SIECI

Sieć składa się z pojedynczej warstwy `layer_lstm` i klasyfikatora `dense` z funkcją aktywacji `softmax`. Pamiętajmy o tym, że generowanie danych sekwencyjnych nie musi być przeprowadzane przy użyciu rekurencyjnych sieci neuronowych. Ostatnio coraz częściej stosuje się w tym celu jednowymiarowe sieci konwolucyjne.

### Listing 8.4. Model jednowarstwowej sieci LSTM przewidujący kolejny znak

```

model <- keras_model_sequential() %>%
  layer_lstm(units = 128, input_shape = c(maxlen, length(chars))) %>%
  layer_dense(units = length(chars), activation = "softmax")

```

Wartości docelowe (znaki) są zakodowane przy użyciu techniki gorącej jedynki, a więc funkcją straty trenowanego modelu będzie `categorical_crossentropy`.

### Listing 8.5. Konfiguracja kompilacji modelu

```

optimizer <- optimizer_rmsprop(lr = 0.01)

model %>% compile(
  loss = "categorical_crossentropy",
  optimizer = optimizer
)

```

## TRENOWANIE MODELU JĘZYKA I PRÓBKOWANIE Z NIEGO

Dysponując wytrenowanym modelem i kawałkiem początkowego tekstu, możemy wygenerować nowy tekst. W tym celu należy powtarzać następujące operacje:

1. Użyj modelu w celu wygenerowania rozkładu prawdopodobieństwa następnego znaku kontynuującego obecny tekst.
2. Zmodyfikuj rozkład, korzystając z określonej wartości parametru `temperature`.
3. Przeprowadź operację losowego próbkowania następnego znaku na podstawie zmodyfikowanego rozkładu.
4. Dodaj nowy znak na końcu obecnego tekstu.

Oto kod używany do zmiany wag rozkładu prawdopodobieństwa wygenerowanego przez model. Kod ten tworzy funkcję próbkującą, która również określa indeks znaku.



**Listing 8.6. Funkcja próbkująca kolejny znak na podstawie przewidywań modelu**

```
sample_next_char <- function(preds, temperature = 1.0) {
  preds <- as.numeric(preds)
  preds <- log(preds) / temperature
  exp_preds <- exp(preds)
  preds <- exp_preds / sum(exp_preds)
  which.max(t(rmultinom(1, 1, preds)))
}
```

Na koniec poniższa pętla wykonuje operację trenowania modelu i generowania tekstu. Wygenerujemy teksty przy różnych wartościach parametru `temperature` (wartości te będą zmieniane przy rozpoczęciu kolejnych epok procesu trenowania). Pozwoli to nam zobaczyć, jak zmienia się tekst wraz z udoskonalaniem modelu, a także to, jak parametr `temperature` wpływa na strategię próbkowania.

**Listing 8.7. Pętla generująca tekst**

```
for (epoch in 1:60) { ← Model będzie trenowany przez 60 epok.

  cat("epoch", epoch, "\n")

  model %>% fit(x, y, batch_size = 128, epochs = 1) ← Dopasowywanie modelu.

  start_index <- sample(1:(nchar(text) - maxlen - 1), 1)
  seed_text <- str_sub(text, start_index, start_index + maxlen - 1) | Losowanie tekstu
                                                                początkowego.

  cat("--- Generowanie przy użyciu tekstu początkowego:", seed_text, "\n\n")

  for (temperature in c(0.2, 0.5, 1.0, 1.2)) { ← Sprawdzanie różnych parametrów
                                                                temperature procesu próbkowania.

    cat("----- Wartość parametru temperature:", temperature, "\n")
    cat(seed_text, "\n")

    generated_text <- seed_text

    for (i in 1:400) { ← Generowanie 400 znaków (proces rozpoczyna się
                                                                od wylosowanego tekstu początkowego).

      sampled <- array(0, dim = c(1, maxlen, length(chars)))
      generated_chars <- strsplit(generated_text, "")[[1]]
      for (t in 1:length(generated_chars)) {
        char <- generated_chars[[t]]
        sampled[1, t, char_indices[[char]]] <- 1
      }

      preds <- model %>% predict(sampled, verbose = 0)
      next_index <- sample_next_char(preds[1,], temperature)
      next_char <- chars[[next_index]] | Próbkiwanie kolejnego znaku.

      generated_text <- paste0(generated_text, next_char)
      generated_text <- substring(generated_text, 2)

      cat(next_char)
    }
    cat("\n\n")
  }
}
```

Oto tekst wygenerowany przy użyciu wylosowanej frazy *new faculty, and the jubilation reached its climax when kant*. Został on uzyskany po 20 epokach trenowania algorytmu — na długo przed osiągnięciem końca procesu trenowania — przy parametrze `temperature` przyjmującym wartość równą 0,2:

new faculty, and the jubilation reached its climax when kant and such a man in the same time the spirit of the surely and the such the such as a man is the sunligh and subject the present to the superiority of the special pain the most man and strange the subjection of the special conscience the special and nature and such men the subjection of the special men, the most surely the subjection of the special intellect of the subjection of the same things and

Oto wynik przy parametrze `temperature` przyjmującym wartość równą 0,5:

new faculty, and the jubilation reached its climax when kant in the eterned and such man as it's also become himself the condition of the experience of off the basis the superiory and the special morty of the strength, in the langus, as which the same time life and "even who discless the mankind, with a subject and fact all you have to be the stand and lave no comes a troveration of the man and surely the conscience the superiority, and when one must be w

A to wynik przy parametrze `temperature` przyjmującym wartość 1,0:

new faculty, and the jubilation reached its climax when kant, as a periliting of manner to all definites and transpects it it so hicable and ont him artiar result too such as if ever the proping to makes as cnecience. to been juden, all every could coldiciousnike hother aw passife, the plies like which might thiod was account, indifferent germin, that everythery certain destrution, intellect into the deteriorablen origin of moralian, and a lessority o

Po 60 epokach proces trenowania można uznać za praktycznie zakończony — tekst generowany przez model zaczyna wyglądać na coraz bardziej składny. Oto tekst wygenerowany przy parametrze `temperature` przyjmującym wartość 0,2:

cheerfulness, friendliness and kindness of a heart are the sense of the spirit is a man with the sense of the sense of the world of the self-end and self-concerning the subjection of the strengthorixes--the subjection of the subjection of the subjection of the self-concerning the feelings in the superiority in the subjection of the subjection of the spirit isn't to be a man of the sense of the subjection and said to the strength of the sense of the

A to tekst wygenerowany przy parametrze `temperature` przyjmującym wartość 0,5:

cheerfulness, friendliness and kindness of a heart are the part of the soul who have been the art of the philosophers, and which the one won't say, which is it the higher the and with religion of the frences. the life of the spirit among the most contineness of the strengthner of the sense the conscience of men of precisely before enough presumption, and can mankind, and something the conceptions, the subjection of the sense and suffering and the

Przy parametrze temperature przyjmującym wartość 1,0 wygenerowany został następujący tekst:

cheerfulness, friendliness and kindness of a heart are spiritual by the  
 ciuture for the  
 entalled is, he astraged, or errors to our you idstood--and it needs,  
 to think by spars to whole the amvives of the newoatly, prefectly  
 raals! it was  
 name, for example but voludd atu-especity"--or rank onee, or even all  
 "solett increessic of the world and  
 implussional tragedy experience, transf, or insiderar,--must hast  
 if desires of the strubction is be stronges

Jak widać, niska wartość parametru temperature prowadzi do uzyskania tekstu, który charakteryzuje się dużą przewidywalnością i powtarzalnością, ale jego lokalna struktura jest bardzo realistyczna — wszystkie wygenerowane słowa (**słowo** jest lokalnym wzorcem składającym się ze znaków) występują w języku angielskim. Przy wyższych wartościach parametru temperature wygenerowany tekst staje się bardziej interesujący, zaskakujący, a nawet kreatywny — algorytm czasami wymyśla nawet nowe słowa, które brzmią tak, jakby były naprawdę istniejącymi słowami (są to np. *eterned* i *troveration*), ale lokalna struktura tekstu zaczyna się załamywać i większość słów wygląda tak, jakby była prawie losowym zbiorem znaków. Bez wątpienia najciekawsze efekty w przypadku tego generowania tekstu uzyskuje się przy parametrze temperature równym 0,5. Zawsze warto eksperymentować z różnymi strategiami próbkowania! Dobra równowaga między wytrenowaną strukturą a losowością sprawi, że wygenerowany tekst będzie interesujący.

Trenując model dłużej, tworząc większy model i stosując większy zbiór danych, można generować próbki, które wyglądają o wiele składniej i bardziej realistycznie. Oczywiście nie należy oczekiwać od modelu wygenerowania tekstu, który będzie miał jakiś większy sens — mechanizm generujący tekst tylko próbkuje litery z modelu statystycznego określającego ich kolejność. Język jest kanałem komunikacji, a rozmowy dotyczące różnych tematów charakteryzują się inną strukturą statystyczną. Tezę tę można udowodnić, odpowiadając sobie na pytanie: co, jeżeli język ludzki zostałby skompresowany tak, jak kompresowana jest większość cyfrowej komunikacji między komputerami? Wówczas język przenosiłby tyle samo informacji, ale nie charakteryzowałby się żadną ukrytą strukturą statystyczną, co uniemożliwiłoby wytrenowanie modelu języka w sposób, w jaki zrobiliśmy to przed chwilą.

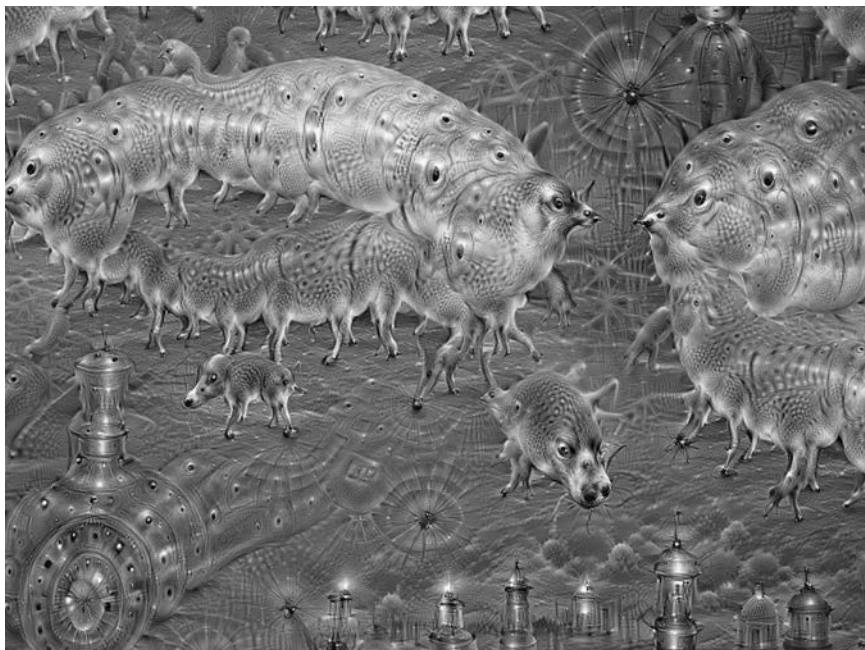
### 8.1.5. Wnioski

- Dyskretna sekwencja danych może zostać wygenerowana poprzez trenowanie modelu pod kątem przewidywania kolejnych elementów tekstu na podstawie wcześniejszego ciągu znaków.
- Model trenowany na zbiorze danych tekstowych określany jest mianem **modelu języka**. Może on być oparty na słowach lub literach.
- Próbkowanie zbioru elementów tekstu wymaga kompromisu między bezkrytycznym przyjmowaniem przewidywań modelu a losowością.

- Można to zrobić przy użyciu parametru *temperature* funkcji *softmax*. Wybór właściwej wartości tego parametru powinien zostać dokonany na drodze eksperymentów.

## 8.2. DeepDream

**DeepDream** to technika artystycznego modyfikowania obrazów, która korzysta z reprezentacji wyuczonych przez konwolucyjne sieci neuronowe. Została ona upubliczniona przez firmę Google w 2015 r. w postaci implementacji napisanej z wykorzystaniem biblioteki uczenia głębokiego o nazwie Caffe (miało to miejsce kilka miesięcy przed opublikowaniem pierwszej wersji pakietu TensorFlow)<sup>4</sup>. Rozwiązanie to bardzo szybko wywołało sensację z powodu generowania obrazów przypominających narkotyczne wizje (patrz przykład przedstawiony na rysunku 8.3) — grafiki te były pełne różnych artefaktów, psich oczu, piór ptaków itd., co wynikało z tego, że sieć konwolucyjna DeepDream była trenowana na zbiorze ImageNet, w którym zdjęć psów i ptaków jest więcej od zdjęć innych zwierząt i przedmiotów.



Rysunek 8.3. Przykładowy obraz wygenerowany przez algorytm DeepDream

Algorytm DeepDream jest bardzo podobny do techniki filtrowania wizualizacji przy użyciu konwolucyjnej sieci neuronowej przedstawionej w rozdziale 5. Rozwiązanie to składało się z sieci konwolucyjnej działającej odwrotnie — dane wejściowe były prze-

<sup>4</sup> Alexander Mordvintsev, Christopher Olah i Mike Tyka, *DeepDream: A Code Example for Visualizing Neural Networks*, Google Research Blog, 1 lipca 2015 r., <http://mng.bz/xXLM>.

tworzane przez algorytm wzrostu gradientowego w celu maksymalizacji aktywacji wybranego filtra górnej warstwy konwolucyjnej sieci neuronowej. Twórcy algorytmu DeepDream skorzystali z tego samego rozwiązania, ale opracowany przez nich algorytm charakteryzuje się pewnymi różnicami:

- W algorytmie DeepDream próbuje się maksymalizować aktywację całej warstwy, a nie wybranego filtra, co powoduje jednoczesne mieszanie się wizualizacji wielu cech.
- Generowanie obrazu nie rozpoczyna się od pustego, nieco zaszumianego obrazu wejściowego — na wejściu przetwarzany jest gotowy obraz, co powoduje nanszenie efektów na utworzony wcześniej obraz — elementy tego obrazu są zniekształcane w sposób artystyczny.
- Obrazy wejściowe są przetwarzane przy różnych skalach określanych mianem **oktaw**, co ma na celu poprawienie jakości wizualizacji.

Spróbujmy samodzielnie wygenerować jakieś ciekawe obrazy.

### 8.2.1. Implementacja algorytmu DeepDream w pakiecie Keras

Zacniemy od konwolucyjnej sieci neuronowej wytrenowanej na zbiorze obrazów ImageNet. Pakiet Keras zawiera wiele takich sieci. Są to między innymi: VGG16, VGG19, Xception i ResNet50. Algorytm DeepDream może zostać zaimplementowany przy użyciu każdej z tych sieci, ale wybór sieci będzie miał oczywiście wpływ na generowane wizualizacje. Wynika to z tego, że różne architektury sieci konwolucyjnych uczą się różnych cech. W oryginalnym algorytmie DeepDream zastosowano model Inception. Wykorzystanie tego modelu pozwala na wygenerowanie ładnie wyglądających grafik, a więc skorzystamy z modelu Inception V3 dołączonego do pakietu Keras.

#### Listing 8.8. Ładowanie wytrenowanego modelu Inception V3

```
library(keras)
```

```
K.set_learning_phase(0)
```

```
model <- application_inception_v3(
  weights = "imagenet",
  include_top = FALSE,
)
```

← Nie będziemy trenować modelu. Polecenie to wyłącza wszystkie operacje używane tylko podczas trenowania.

Sieć Inception V3 jest budowana bez swojej konwolucyjnej bazy. Model zostanie załadowany z wagami wytrenowanymi na zbiorze ImageNet.

Następnie musimy zająć się obliczaniem **straty** — wartości, którą będziemy starali się maksymalizować w procesie wzrostu gradientu. W rozdziale 5. podczas filtrowania wizualizacji staraliśmy się maksymalizować wartość określonego filtra wybranej warstwy sieci. Tym razem będziemy jednocześnie maksymalizować aktywację wszystkich filtrów wielu warstw, a konkretnie rzecz biorąc, będziemy maksymalizować sumę normy L2 aktywacji zbioru warstw wysokiego poziomu. Wybór warstw (a także dokładanie się poszczególnych warstw do finalnej wartości straty) ma największy wpływ na generowane wizualizacje. W związku z tym chcemy, aby parametry te można było z łatwością modyfikować. Niższe warstwy odpowiadają za wzorce geometryczne,

a wyższe warstwy odpowiadają za elementy obrazu pozwalające na rozpoznawanie klas zbioru ImageNet (np. ptaków lub psów). Zaczniemy od niezbyt optymalnej konfiguracji czterech warstw, ale z pewnością warto wypróbować później działanie wielu innych konfiguracji.

#### Listing 8.9. Konfiguracja algorytmu DeepDream

```
layer_contributions <- list(
  mixed2 = 0.2,
  mixed3 = 3,
  mixed4 = 2,
  mixed5 = 1.5
)
```

Lista z nazwami przypisująca nazwy warstw do współczynników wpływu aktywacji warstw na wartość straty, którą chcemy maksymalizować. Zauważ, że nazwy warstw są wprowadzone na stałe w wbudowanej aplikacji Inception V3. Listę nazw wszystkich warstw modelu można wyświetlić za pomocą polecenia `summary(model)`.

Teraz czas zdefiniować tensor zawierający wartość straty: ważoną sumę normy L2 aktywacji warstw z listingu 8.9.

#### Listing 8.10. Definiowanie mechanizmu maksymalizującego wartość straty

```
layer_dict <- model$layers
names(layer_dict) <- lapply(layer_dict, function(layer) layer$name)
```

Tworzy listę przypisującą nazwy warstw do instancji warstw.

```
loss <- k_variable(0)
```

Strata będzie definiowana przez dodanie wartości charakteryzujących wpływ poszczególnych warstw na stratę.

```
for (layer_name in names(layer_contributions)) {
  coeff <- layer_contributions[[layer_name]]
  activation <- layer_dict[[layer_name]]$output
  scaling <- k_prod(k_cast(k_shape(activation), "float32"))
  loss <- loss + (coeff * k_sum(k_square(activation)) / scaling)
}
```

Przechwytuje wyjście warstwy.

Dodaje normę L2 cech warstwy do straty.

Teraz możemy uruchomić proces wzrostu gradientu.

#### Listing 8.11. Proces wzrostu gradientu

```
dream <- model$input
```

W tym tensorze znajduje się wygenerowany obraz (wizja).

```
grads <- k_gradients(loss, dream)[[1]]
```

Oblicza gradienty wizji na podstawie wartości straty.

```
grads <- grads / k_maximum(k_mean(k_abs(grads)), 1e-7)
```

Normalizuje gradienty (to ważny zabieg).

```
outputs <- list(loss, grads)
fetch_loss_and_grads <- k_function(list(dream), outputs)
```

Konfiguruje funkcję Keras służącą do uzyskiwania wartości straty i gradientów na podstawie obrazu wejściowego.

```
eval_loss_and_grads <- function(x) {
  outs <- fetch_loss_and_grads(list(x))
  loss_value <- outs[[1]]
  grad_values <- outs[[2]]
  list(loss_value, grad_values)
}
gradient_ascent <- function(x, iterations, step, max_loss = NULL) {
  for (i in 1:iterations) {
    c(loss_value, grad_values) %<-% eval_loss_and_grads(x)
    if (!is.null(max_loss) && loss_value > max_loss)
```

Funkcja wykonująca iteracje procesu wzrostu gradientu.

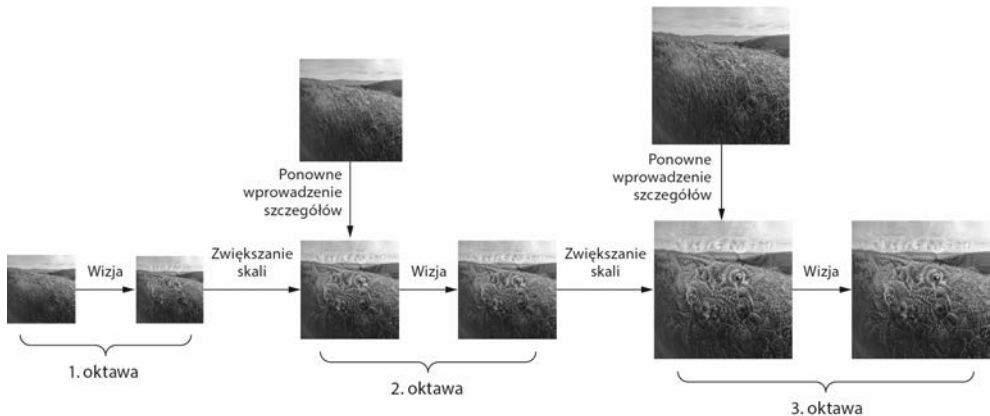
```

break
cat("...Wartość straty", i, ":", loss_value, "\n")
x <- x + (step * grad_values)
}
x
}

```

**Funkcja wykonująca iteracje procesu wzrostu gradientu.**

Na koniec możemy zająć się właściwym algorytmem DeepDream. Na początku definiowana jest lista **skal** (nazywanych również **oktawami**), które są używane podczas przetwarzania obrazów. Każda kolejna skala jest większa od poprzedniej o współczynnik równy 1,4 (jest o 40% większa) — zaczynamy od przetwarzania małego obrazu, a następnie zwiększamy jego skalę (patrz rysunek 8.4).



**Rysunek 8.4.** Działanie algorytmu DeepDream: następujące po sobie operacje skalowania przestrzennego (oktawy) i dodawania szczegółów

Po każdej kolejnej operacji skalowania (od najmniejszej do największej) uruchamiany jest algorytm wzrostu gradientu w celu maksymalizacji zdefiniowanej wcześniej straty przy danej skali. Po każdym zakończeniu pracy tego algorytmu skala obrazu jest zwiększana o 40%.

W celu uniknięcia utraty dużej ilości szczegółów obrazu po każdej operacji skalowania (w wyniku tych operacji otrzymywany jest coraz bardziej rozmyty i rozpixselowany obraz) możemy wykonać prosty zabieg polegający na ponownym dodaniu utraconych szczegółów do obrazu. Jest to możliwe do wykonania, ponieważ wiemy, jak powinien wyglądać oryginalny obraz w większej rozdzielczości. Dysponując obrazem  $S$  o małym rozmiarze i obrazem  $L$  o większym rozmiarze, możemy przekształcić obraz  $L$  do rozmiaru obrazu  $S$  i określić różnice między tymi obrazami — różnica ta będzie wskazywać utracone szczegóły.

**Listing 8.12.** Określanie wzrostu gradientu przy kolejnych operacjach skalowania obrazu

```

step <- 0.01 ← Rozmiar kroku algorytmu wzrostu gradientu.
num_octave <- 3 ← Liczba operacji skalowania, przy których
                   naależy uruchomić algorytm wzrostu gradientu.

```

**Modyfikacja tych parametrów pozwala na uzyskanie innych efektów wizualnych.**

```

octave_scale <- 1.4
iterations <- 20
max_loss <- 10.
base_image_path <- '...'
img <- preprocess_image(base_image_path)

original_shape <- dim(img)[-1]
successive_shapes <- list(original_shape)
for (i in 1:num_octave) {
  shape <- as.integer(original_shape / (octave_scale ^ i))
  successive_shapes[[length(successive_shapes) + 1]] <- shape
}
successive_shapes <- rev(successive_shapes)

original_img <- img
shrunk_original_img <- resize_img(img, successive_shapes[[1]])

for (shape in successive_shapes) {
  cat("Zmiana kształtu obrazu", shape, "\n")
  img <- resize_img(img, shape)
  img <- gradient_ascent(img,
    iterations = iterations,
    step = step,
    max_loss = max_loss)

  upscaled_shrunk_original_img <- resize_img(shrunk_original_img, shape)
  same_size_original <- resize_img(original_img, shape)
  lost_detail <- same_size_original - upscaled_shrunk_original_img

  img <- img + lost_detail
  shrunk_original_img <- resize_img(original_img, shape)
  save_img(img, fname = sprintf("dream/at_scale_%s.png",
    paste(shape, collapse = "x")))
}

```

**Różnica między rozmiarami kolejnych wersji obrazu.**

**Liczba kroków wzrostu wykonywanych przy każdej operacji skalowania.**

**Jeżeli strata przekroczy wartość równą 10, to proces wzrostu gradientu zostanie przerwany w celu zapobieżenia powstawania brzydkich artefaktów.**

**Tu należy umieścić ścieżkę obrazu, który chcemy przetwarzać.**

**Ładowanie obrazu do tablicy (funkcję tę zdefiniowano w listingu 8.13).**

**Przygotowywanie listy kształtów definiujących skalowania, przy których uruchomiony zostanie algorytm wzrostu gradientu.**

**Odwracanie listy kształtów tak, aby znalazły się w kolejności rosnącej.**

**Zmiana rozmiaru tablicy obrazu w celu zmniejszenia jego skali.**

**Zwiększanie skali generowanego obrazu.**

**Po wygenerowaniu obrazu uruchamiany jest algorytm wzrostu gradientu.**

**Przeskalowywanie mniejszej wersji oryginalnego obrazu (obraz ten będzie rozpikselowany).**

**Tworzenie wersji oryginalnego obrazu o tym rozmiarze, mającej wysoką jakość.**

**Przywracanie szczegółów.**

**Różnica między tymi obrazami określa szczegóły utracone podczas zwiększania skali obrazu.**

W kodzie algorytmu zwiększania gradientu zastosowano poniższe funkcje pomocnicze.

#### Listing 8.13. Funkcje pomocnicze

```

resize_img <- function(img, size) {
  image_array_resize(img, size[[1]], size[[2]])
}

save_img <- function(img, fname) {
  img <- deprocess_image(img)
  image_array_save(img, fname)
}

```



```

preprocess_image <- function(image_path) {
  image_load(image_path) %>%
  image_to_array() %>%
  array_reshape(dim = c(1, dim(.))) %>%
  inception_v3_preprocess_input()
}

deprocess_image <- function(img) {
  img <- array_reshape(img, dim = c(dim(img)[[2]], dim(img)[[3]], 3))
  img <- img / 2
  img <- img + 0.5
  img <- img * 255

  dims <- dim(img)
  img <- pmax(0, pmin(img, 255))
  dim(img) <- dims
  img
}

```

← Funkcja narzędziowa używana podczas otwierania obrazu, zmiany jego rozdzielczości i zapisywania go w formie tensora, który może zostać przetworzony przez sieć Inception V3.

← Funkcja narzędziowa konwertująca tensor do postaci właściwego obrazu.

← Cofa obróbkę wstępną dokonaną przez funkcję `imagenet_preprocess_input`.

**UWAGA** Oryginalna wersja sieci Inception V3 była trenowana pod kątem rozpoznawania elementów obrazów o rozdzielczości 299×299, a w naszym procesie zmniejszamy rozdzielczość obrazu o określony współczynnik, tak więc zaprezentowana implementacja algorytmu DeepDream daje najlepsze efekty podczas pracy z obrazami o rozdzielczości znajdującej się w zakresie od 300×300 do 400×400. Pomimo tego możesz spróbować użyć tego kodu do przetworzenia obrazu o dowolnej rozdzielczości i dowolnych proporcjach.

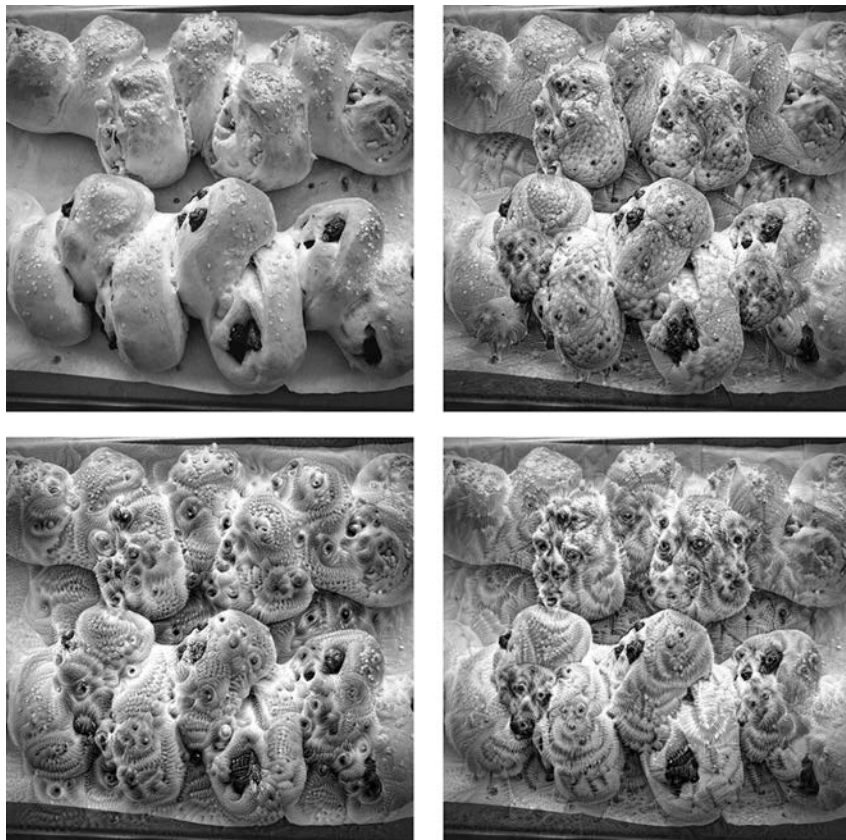
Na rysunku 8.5 pokazano efekt przetwarzania zdjęcia wykonanego na wzgórzach pomiędzy zatoką San Francisco a kampusem firmy Google.



**Rysunek 8.5.** Przetwarzanie przykładowego obrazu za pomocą algorytmu DeepDream

Polecam samodzielną zabawę tym algorytmem poprzez zmianę warstw, które są używane podczas obliczania straty. Niższe warstwy sieci zawierają bardziej lokalne, mniej abstrakcyjne reprezentacje danych i prowadzą do generowania wzorów, które bardziej przypominają kształty geometryczne. Wyższe warstwy sieci natomiast prowadzą do

generowania bardziej rozpoznawalnych wzorców wizualnych przypominających najpopularniejsze obiekty zbioru ImageNet, takie jak oczy psa czy ptasie pióra. W celu szybkiego sprawdzenia efektów różnych kombinacji warstw możesz skorzystać z mechanizmu losowego generowania parametrów słownika `layer_contributions`. Na rysunku 8.6 przedstawiono efekty przetwarzania obrazu domowych wypieków uzyskane z wykorzystaniem różnych konfiguracji warstw sieci neuronowej.



**Rysunek 8.6.** Przetwarzanie przykładowego obrazu przez różne konfiguracje algorytmu DeepDream

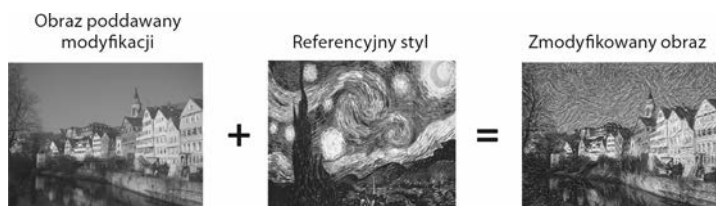
### 8.2.2. Wnioski

- Algorytm DeepDream składa się z sieci konwolucyjnej działającej na odwrót. Sieć ta generuje obrazy wejściowe na podstawie wyuczonych przez nią reprezentacji danych.
- Uzyskane obrazy są ciekawe i przypominają wizje generowane przez ośrodek wzroku człowieka, który zażył środki psychodeliczne.
- Możliwości tego procesu nie ograniczają się do przetwarzania grafiki i korzystania z sieci konwolucyjnych. Można go użyć także w celu zniekształcania np. mowy lub muzyki.

### 8.3. Neuronowy transfer stylu

Kolejnym ważnym rozwiązaniem modyfikującym obrazy, opartym na technologii uczenia głębokiego, jest **neuronowy transfer stylu** opracowany latem 2015 r. przez zespół kierowany przez Leona Gatysę<sup>5</sup>. Algorytm neuronowego transferu stylu od tego czasu był wielokrotnie usprawniany i modyfikowany. Zastosowano go w wielu aplikacjach pozwalających na edycję zdjęć przy użyciu smartfona. Dla uproszczenia skupimy się na oryginalnej wersji tego algorytmu.

Neuronowy transfer stylu polega na zastosowaniu stylu obrazu referencyjnego w celu przetworzenia innego obrazu z zachowaniem jego zawartości. Przykład tego procesu pokazano na rysunku 8.7.



Rysunek 8.7. Przykład transferu stylu

Pojęcie **stylu** odnosi się do tekstur, kolorów i sposobu przedstawiania rzeczy widocznych na obrazie. **Treścią** określamy wysokopoziomową makrostrukturę obrazu. Niebieskie i żółte linie narysowane pędzlem widoczne na rysunku 8.7 (obraz *Gwiazdzysta noc*, namalowany przez Vincenta van Gogha) charakteryzują styl, a budynki widoczne na zdjęciu Tübingen są treścią.

Idea transferu stylu powiązana z generowaniem tekstur była znana w środowisku osób zajmujących się przetwarzaniem obrazu na długo przed pojawieniem się w 2015 r. neuronowego transferu stylu, ale transfer stylu oparty na technikach uczenia głębokiego okazał się dawać o wiele lepsze rezultaty od tych, które uzyskiwano z zastosowaniem klasycznych technik przetwarzania obrazu. Ta nowatorska technika zyskała wiele kreatywnych zastosowań.

Implementacja transferu stylu jest oparta na tych samych rozwiązaniach, co wszystkie algorytmy uczenia głębokiego — definiujemy w niej funkcję straty i staramy się ją zminimalizować. Celem algorytmu jest zachowanie treści oryginalnego obrazu przy jednoczesnym przyjęciu stylu obrazu referencyjnego. Gdybyśmy mogli matematycznie zdefiniować treść (content) i styl (style), to wówczas funkcja straty (loss) miałaby następującą postać:

$$\text{loss} \leftarrow \text{distance}(\text{style}(\text{reference\_image}) - \text{style}(\text{generated\_image})) + \text{distance}(\text{content}(\text{original\_image}) - \text{content}(\text{generated\_image}))$$

Distance (odległość) jest funkcją normy takiej jak norma L2, content jest funkcją przyjmującą obraz i generującą reprezentację jego treści, a style — funkcją przyjmującą obraz i obliczającą reprezentację jego stylu. Minimalizacja straty sprawia, że wartość zwracana przez funkcję  $\text{style}(\text{generated\_image})$  zbliża się do wartości zwracanej przez

<sup>5</sup> Leon A. Gatys, Alexander S. Ecker i Matthias Bethge, *A Neural Algorithm of Artistic Style*, arXiv, 2015, <https://arxiv.org/abs/1508.06576>.

`style(reference_image)`, a `content(generated_image)` zbliża się do `content(original_image)`, co prowadzi do zdefiniowanego wcześniej transferu stylu.

Głównym spostrzeżeniem Gatysa i jego zespołu było to, że głębokie konwolucyjne sieci neuronowe umożliwiają matematyczne zdefiniowanie funkcji `style` i `content`. Sprawdźmy, jak do tego dochodzi.

### 8.3.1. Strata treści

Przypominam, że aktywacje wcześniejszych warstw sieci zawierają **lokalne** informacje o obrazie, a aktywacje wyższych warstw zawierają coraz bardziej **globalne** i **abstrakcyjne** informacje. W związku z tym można przyjąć, że aktywacje różnych warstw konwolucyjnej sieci zawierają rozkład treści obrazu przeprowadzony według różnych przestrzennych skal, a więc treść obrazu, która jest bardziej globalna i abstrakcyjna, powinna być opisywana przez reprezentacje górnych warstw sieci konwolucyjnej.

Dobrym kandydatem na funkcję straty treści jest norma L2 pomiędzy aktywacjami górnej warstwy uprzednio wytrenowanej sieci neuronowej, obliczona przy użyciu przetwarzanego obrazu i aktywacji tej samej warstwy określonych z zastosowaniem wygenerowanego obrazu. Rozwiązanie takie gwarantuje to, że z punktu widzenia górnej warstwy wygenerowany obraz będzie wyglądał podobnie do oryginalnego obrazu, oczywiście przy założeniu, że górne warstwy konwolucyjnej sieci neuronowej naprawdę „widzą” treść obrazów wejściowych. Wówczas rozwiązanie takie pozwoli na zachowanie treści obrazu.

### 8.3.2. Strata stylu

Mechanizm obliczający stratę treści korzysta tylko z jednej górnej warstwy, a mechanizm obliczający stratę stylu według Gatysa korzysta z wielu warstw sieci konwolucyjnej — próbujemy wziąć pod uwagę styl referencyjnego obrazu, który jest rozsiany po wszystkich przestrzennych skalach sieci konwolucyjnej. Gates, określając stratę stylu, korzysta z **macierzy Grama** składającej się z aktywacji warstw — iloczynu skalarnego map cech danej warstwy. Iloczyn skalarny może być rozumiany jako reprezentacja mapy korelacji między cechami warstwy. Korelacje cech określają parametry statystyczne wzorców poszczególnych skal przestrzennych, co empirycznie odpowiada wyglądowi tekstur skal.

Mechanizm obliczający stratę stylu próbuje zachować podobne do siebie wewnętrzne korelacje wewnątrz aktywacji różnych warstw między stylem obrazu referencyjnego a stylem obrazu wygenerowanego. Rozwiązanie to sprawia, że tekstury znalezione w różnych przestrzennych skalach obrazu referencyjnego mają podobny styl do tych, które występują w wygenerowanym obrazie.

Ogólnie rzecz biorąc, możemy skorzystać z wytrenowanej wcześniej konwolucyjnej sieci neuronowej w celu zdefiniowania funkcji straty, która:

- Zachowa treść poprzez utrzymanie podobnych wysokopoziomowych warstw aktywacji treści przetwarzanego obrazu i wygenerowanego obrazu. Sieć konwolucyjna powinna „postrzegać” oba te obrazy tak, jakby przedstawiały to samo.

- Zachowa styl, utrzymując podobne **korelacje** aktywacji warstw niskiego poziomu, a także warstw wysokiego poziomu. Korelacje cech odwzorowują **tekstury** — wygenerowany obraz i obraz referencyjny powinny charakteryzować się takimi samymi teksturami na różnych przestrzennych skalach.

Przyjrzyjmy się implementacji w Keras oryginalnego algorytmu neuronowego transferu stylu opracowanego w 2015 r. Rozwiązanie to jest pod wieloma względami podobne do implementacji algorytmu DeepDream zaprezentowanej w poprzednim podrozdziale.

### 8.3.3. Implementacja neuronowego transferu stylu przy użyciu pakietu Keras

Neuronowy transfer stylu może zostać zaimplementowany przy użyciu dowolnej wytrenowanej wcześniej konwolucyjnej sieci neuronowej. Skorzystamy z sieci VGG19 — tej samej, z której korzystał również Gates. VGG19 jest prostą wersją sieci VGG16 opisaną w rozdziale 5. Sieć ta zawiera trzy dodatkowe warstwy konwolucyjne.

Oto czynności, które musisz wykonać:

1. Skonfiguruj sieć obliczającą jednocześnie aktywacje warstw VGG19 obrazu referencyjnego, obrazu przetwarzanego i obrazu wyjściowego.
2. Skorzystaj z obliczonych aktywacji warstw wszystkich trzech obrazów w celu zdefiniowania opisanej wcześniej funkcji straty, którą będziesz minimalizować w celu osiągnięcia transferu stylu.
3. Skonfiguruj algorytm spadku gradientowego w celu zminimalizowania funkcji straty.

Zacznijmy od zdefiniowania ścieżek obrazu referencyjnego i obrazu, który ma zostać przetworzony. Transfer przebiega łatwiej w przypadku obrazów o zbliżonych rozmiarach, a więc później zmienimy rozmiary obrazów tak, aby wszystkie miały wysokość 400 pikseli.

**Listing 8.14.** Początkowe definiowanie zmiennych

```
library(keras)

target_image_path <- 'img/portrait.jpg' ← Ścieżka obrazu, który ma zostać
                                        zmodyfikowany.

style_reference_image_path <- "img/transfer_style_reference.jpg" ← Ścieżka obrazu
                                                                    referencyjnego.

img <- image_load(target_image_path) ← Wymiary wygenerowanego obrazu.
width <- img$size[[1]]
height <- img$size[[2]]
img_nrows <- 400
img_ncols <- as.integer(width * img_nrows / height)
```

Potrzebujemy jeszcze funkcji pomocniczych służących do ładowania, przetwarzania wstępnego i przetwarzania końcowego obrazów wejściowych i wyjściowych sieci konwolucyjnej VGG19.

Listing 8.15. Funkcje pomocnicze

```

preprocess_image <- function(path) {
  img <- image_load(path, target_size = c(img_nrows, img_ncols)) %>%
    image_to_array() %>%
    array_reshape(c(1, dim()))
  imagenet_preprocess_input(img)
}

eprocess_image <- function(x) {
  x <- x[1,..]
  x[.,1] <- x[.,1] + 103.939
  x[.,2] <- x[.,2] + 116.779
  x[.,3] <- x[.,3] + 123.68
  x <- x[.,c(3,2,1)]
  x[x > 255] <- 255
  x[x < 0] <- 0
  x[] <- as.integer(x)/255
  x
}

```

**Wyśrodkowywanie w punkcie zerowym poprzez usunięcie średniej wartości pikseli zbioru ImageNet. Proces ten odwraca transformację przeprowadzoną przez funkcję `imagenet_preprocess_input`.**

**Konwersja z systemu BGR na system RGB. Proces ten jest częścią odwracania działania modułu `vgg19.preprocess_input`.**

Czas skonfigurować sieć VGG19. Na wejściu przyjmuje ona wsad składający się z trzech obrazów: obrazu referencyjnego, obrazu przetwarzanego i obrazu zastępczego, który zostanie wypełniony wygenerowaną grafiką. Obraz zastępczy jest symbolicznym tensorem, którego wartości są ustalane z zewnątrz przy użyciu tablic. Obraz referencyjny i obraz przetwarzany mają charakter statyczny, a więc definiuje się je przy użyciu polecenia `k_constant`. Dane obrazu zastępczego będą z czasem wypełniane danymi obrazu generowanego.

Listing 8.16. Ładowanie wytrenowanej wcześniej sieci VGG19 i kierowanie do niej trzech obrazów

```

target_image <- k_constant(preprocess_image(target_image_path))
style_reference_image <- k_constant(
  preprocess_image(style_reference_image_path)
)
combination_image <- k_placeholder(c(1, img_nrows, img_ncols, 3))

input_tensor <- k_concatenate(list(target_image, style_reference_image,
  combination_image), axis = 1)

model <- application_vgg19(input_tensor = input_tensor,
  weights = "imagenet",
  include_top = FALSE)

cat("Model został załadowany.\n")

```

**Obiekt zastępczy, który zostanie wypełniony danymi wygenerowanego obrazu.**

**Wsad składający się z trzech obrazów.**

**Budowanie sieci VGG19 z danymi wejściowymi w postaci wsadu składającego się z trzech obrazów. Model zostanie załadowany z wagami wytrenowanymi wcześniej na podstawie zbioru ImageNet.**

Czas zdefiniować stratę treści, dzięki której górna warstwa sieci konwulucyjnej VGG19 będzie postrzegać w podobny sposób obraz przetwarzany i obraz generowany.

**Listing 8.17. Strata treści**

```
content_loss <- function(base, combination) {
  k_sum(k_square(combination - base))
}
```

Teraz możemy zdefiniować stratę stylu. Podczas jej obliczania korzystamy z funkcji pomocniczej tworzącej macierz Grama — mapę korelacji cech początkowej macierzy.

**Listing 8.18. Strata stylu**

```
gram_matrix <- function(x) {
  features <- k_batch_flatten(k_permute_dimensions(x, c(3, 1, 2)))
  gram <- k_dot(features, k_transpose(features))
  gram
}

style_loss <- function(style, combination){
  S <- gram_matrix(style)
  C <- gram_matrix(combination)
  channels <- 3
  size <- img_nrows*img_ncols
  k_sum(k_square(S - C)) / (4 * channels^2 * size^2)
}
```

Do tych dwóch elementów straty należy dodać trzeci — **całkowitą stratę wariacji**. Parametr ten odwołuje się do pikseli wygenerowanego obrazu i ułatwia uzyskanie przestrzennej ciągłości tego obrazu, zapobiegając jego całkowitemu rozpixselowaniu. Można go traktować jako stratę regularyzacji.

**Listing 8.19. Całkowita strata wariacji**

```
total_variation_loss <- function(x) {
  y_ij <- x[,1:(img_nrows - 1L), 1:(img_ncols - 1L),]
  y_ij1 <- x[,2:(img_nrows), 1:(img_ncols - 1L),]
  y_ijl <- x[,1:(img_nrows - 1L), 2:(img_ncols),]
  a <- k_square(y_ij - y_ij1)
  b <- k_square(y_ij - y_ijl)
  k_sum(k_pow(a + b, 1.25))
}
```

Minimalizowana strata będzie średnią ważoną tych trzech strat. W celu obliczenia straty treści musimy odwołać się tylko do jednej górnej warstwy modelu (warstwy `block5_conv2`), ale podczas obliczania strat stylu musimy korzystać z listy warstw, na której znajdują się warstwy niskiego oraz wysokiego poziomu. Na koniec tego procesu należy pamiętać o dodaniu całkowitej straty wariacji.

Najprawdopodobniej podczas samodzielnej pracy odczujesz chęć dostrojenia współczynnika `content_weight` pod kątem wybranych obrazów (referencyjnego i przetwarzanego). Współczynnik ten określa wpływ straty treści na całkowitą wartość straty. Wyższa wartość `content_weight` sprawi, że w wygenerowanym obrazie łatwiej będzie dostrzec zawartość przetwarzanego obrazu.

Listing 8.20. Definiowanie minimalizowanej, ostatecznej wartości straty

```

outputs_dict <- lapply(model$layers, `[["output"]`
names(outputs_dict) <- lapply(model$layers, `[["name"]`

content_layer <- 'block5_conv2'
style_layers = c("block1_conv1", "block2_conv1",
                "block3_conv1", "block4_conv1",
                "block5_conv1")
total_variation_weight <- 1e-4
style_weight <- 1.
content_weight <- 0.025

loss <- K.variable(0.)

layer_features <- outputs_dict[[content_layer]]
target_image_features <- layer_features[1,...]
combination_features <- layer_features[3,...]
loss <- loss + content_weight * content_loss(target_image_features,
                                             combination_features)

for (layer_name in style_layers){
  layer_features <- outputs_dict[[layer_name]]
  style_reference_features <- layer_features[2,...]
  combination_features <- layer_features[3,...]
  s1 <- style_loss(style_reference_features, combination_features)
  loss <- loss + ((style_weight / length(style_layers)) * s1)
}

loss <- loss +
  (total_variation_weight * total_variation_loss(combination_image))

```

**Lista przypisująca nazwy warstw do tensorów aktywacji.**  
**Warstwa używana podczas obliczania straty treści.**  
**Warstwy używane podczas obliczania straty stylu.**  
**Wagi używane podczas obliczania średniej ważonej (całkowitej wartości straty).**  
**Strata jest definiowana przez dodawanie wszystkich komponentów do tej zmiennej skalarnej.**  
**Dodawanie straty treści.**  
**Dla każdej warstwy dodawany jest komponent straty stylu.**  
**Dodawanie całkowitej straty wariacji.**

Na koniec musimy skonfigurować algorytm spadku gradientowego. W pracy Gatysa optymalizacja jest przeprowadzana przy użyciu algorytmu L-BFGS. Skorzystamy z tego samego rozwiązania. To jedna z ważniejszych różnic między tą implementacją neuronalnego transferu stylu a implementacją techniki DeepDream opisaną w poprzednim podrozdziale. Implementacja algorytmu L-BFGS jest w postaci funkcji `optim()`, ale charakteryzuje się dwoma ograniczeniami:

- Wymaga przekazania wartości funkcji straty i wartości gradientów w formie dwóch oddzielnych funkcji.
- Można jej używać tylko do przetwarzania płaskich wektorów, a my mamy do przetworzenia trójwymiarową tablicę reprezentującą obraz.

Obliczanie wartości funkcji straty i wartości gradientów w sposób niezależny byłoby niewydajne, ponieważ wiązałoby się z koniecznością wykonywania wielu zbędnych obliczeń — taki proces przebiegałby praktycznie dwukrotnie wolniej od procesu jednoczesnego obliczania tych wartości. W celu obejścia tego ograniczenia skorzystamy z klasy R6 o nazwie `Evaluator`, która jednocześnie oblicza wartość straty i wartości gradientów, a następnie przy pierwszym wywołaniu zwraca wartość straty, a przy drugim — wartości gradientów.



Listing 8.21. Konfiguracja algorytmu spadku gradientowego

```

grads <- k_gradients(loss, combination_image)[[1]]
fetch_loss_and_grads <-
  k_function(list(combination_image), list(loss, grads))

eval_loss_and_grads <- function(image) {
  image <- array_reshape(image, c(1, img_nrows, img_ncols, 3))
  outs <- fetch_loss_and_grads(list(image))
  list(
    loss_value = outs[[1]],
    grad_values = array_reshape(outs[[2]], dim = length(outs[[2]]))
  )
}

library(R6)
Evaluator <- R6Class("Evaluator",
  public = list(
    loss_value = NULL,
    grad_values = NULL,

    initialize = function() {
      self$loss_value <- NULL
      self$grad_values <- NULL
    },

    loss = function(x){
      loss_and_grad <- eval_loss_and_grads(x)
      self$loss_value <- loss_and_grad$loss_value
      self$grad_values <- loss_and_grad$grad_values
      self$loss_value
    },

    grads = function(x){
      grad_values <- self$grad_values
      self$loss_value <- NULL
      self$grad_values <- NULL
      grad_values
    }
  )
)

evaluator <- Evaluator$new()

```

Ustawianie wartości gradientów wygenerowanego obrazu.

Funkcja przechwytyjąca bieżące wartości straty i gradientów.

Klasa obudowująca funkcję `fetch_loss_and_grads` w sposób umożliwiający uzyskanie wartości strat i gradientów za pomocą wywołań dwóch oddzielnych metod, co jest wymagane przez wybrany optymalizator, którego będziemy używać.

Na koniec uruchamiamy proces wzrostu gradientowego. Korzystamy z algorytmu L-BFGS. W każdej iteracji algorytmu zapisujemy aktualną wersję generowanego obrazu (pojedyncza iteracja jest reprezentacją 20 kroków algorytmu wzrostu gradientu).

Listing 8.22. Pętla transferu stylu

```

iterations <- 20

dms <- c(1, img_nrows, img_ncols, 3)

x <- preprocess_image(target_image_path)
x <- array_reshape(x, dim = length(x))

```

Stan początkowy: obraz docelowy.

Splaszczamy obraz, ponieważ optymalizator może przetwarzać tylko płaskie wektory.

```

for (i in 1:iterations) {
  opt <- optim(
    array_reshape(x, dim = length(x)),
    fn = evaluator$loss,
    gr = evaluator$grads,
    method = "L-BFGS-B",
    control = list(maxit = 15)
  )

  cat("Strata:", opt$value, "\n")

  image <- x <- opt$par
  image <- array_reshape(image, dms)

  im <- deprocess_image(image)
  plot(as.raster(im))
}

```

**Optymalizacja L-BFGS przetwarza piksele wygenerowanego obrazu w celu zminimalizowania straty. Zwróć uwagę na konieczność przekazania funkcji obliczającej stratę i funkcji obliczającej gradienty w formie dwóch oddzielnych argumentów.**

Na rysunku 8.8 pokazano efekt pracy algorytmu. Pamiętaj o tym, że technika ta przeprowadza transformację polegającą na zmianie tekstur lub ich przeniesieniu. Najlepiej sprawdza się z obrazami referencyjnymi wypełnionymi wyraźnymi teksturami i obrazami źródłowymi, które nie wymagają dużej ilości szczegółów do bycia rozpoznawalnymi. Zwykle nie da się w ten sposób wykonać operacji zmiany stylu portretu. Algorytm ten jest bliższy klasycznym technikom przetwarzania sygnału niż sztucznej inteligencji, a więc nie należy od niego oczekiwać cudów!

Działanie tego algorytmu jest dość powolne, ale transformacja ta jest na tyle prosta, że można jej dokonać również za pomocą małej szybkiej jednokierunkowej sieci konwulucyjnej (wymogiem jest dysponowanie odpowiednim zbiorem danych treningowych). Szybki transfer stylu może być osiągnięty poprzez wygenerowanie wejściowych i wyjściowych obrazów treningowych utrzymanych w jednym stylu za pomocą techniki zaprezentowanej w tym podrozdziale. Po wykonaniu tej operacji należy wytrenować prostą sieć konwulucyjną pod kątem wykonywania transformacji zgodnej z określonym stylem. Teraz zmiana stylu obrazu będzie przeprowadzana praktycznie natychmiastowo w wyniku jednej iteracji algorytmu małej konwulucyjnej sieci neuronowej.

### 8.3.4. Wnioski

- Transfer stylu polega na utworzeniu nowego obrazu, na którym zachowana zostanie treść przetwarzanego obrazu, ale zostanie ona przedstawiona w stylu obrazu referencyjnego.
- Treść może zostać rozpoznana przez aktywacje wysokopoziomowych warstw konwulucyjnej sieci neuronowej.
- Styl może zostać rozpoznany przez wewnętrzne korelacje aktywacji różnych warstw konwulucyjnej sieci neuronowej.
- Uczenie głębokie pozwala na utworzenie mechanizmu transferu stylu w formie procesu optymalizacji korzystającego z funkcji straty zdefiniowanej przy użyciu wytrenowanej wcześniej konwulucyjnej sieci neuronowej.
- Tę prostą ideę można rozbudowywać i modyfikować.



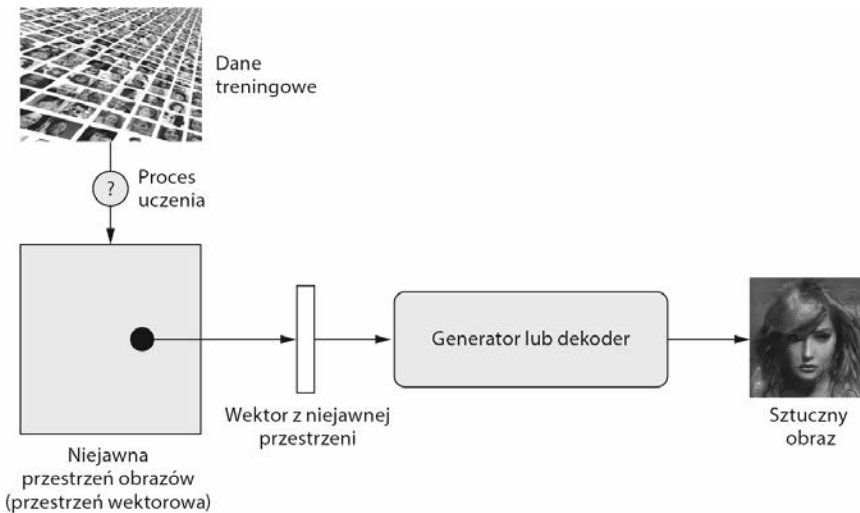
**Rysunek 8.8.** Przykładowe efekty pracy algorytmu

## 8.4. Generowanie obrazów przy użyciu wariacyjnych autoenkoderów

Próbkowanie z niejawnej przestrzeni obrazów w celu utworzenia zupełnie nowych obrazów lub edycji istniejących obrazów jest obecnie najpopularniejszym kreatywnym zastosowaniem sztucznej inteligencji. W tym oraz w kolejnym podrozdziale tej książki opiszę wybrane wysokopoziomowe techniki generowania obrazów oraz przedstawię szczegóły implementacji dwóch technik tego typu: **wariacyjnych autoenkoderów** (ang. *variational autoencoder*, VAE) i **generatywnych sieci z przeciwnikiem** (ang. *generative adversarial network*, GAN). Zastosowania tych technik nie ograniczają się do generowania obrazów. Można ich używać również do generowania dźwięku, muzyki, a nawet tekstu, ale w praktyce najciekawsze rezultaty dają one podczas generowania obrazów, a więc skupimy się na tym zastosowaniu.

### 8.4.1. Próbkowanie z niejawnej przestrzeni obrazów

Głównym elementem procesu generowania obrazu jest tworzenie niskowymiarowej **niejawnej przestrzeni** reprezentacji (oczywiście jest to przestrzeń wektorowa), w której każdy punkt może zostać przypisany do realistycznie wyglądającego obrazu. Moduł zdolny do wykonania takiego mapowania, przyjmujący dowolny punkt w charakterze danych wejściowych i generujący na jego podstawie obraz (siatkę pikseli), określamy mianem **generatora** (w przypadku sieci GAN) lub **dekodera** (w przypadku koderów VAE). Po utworzeniu niejawnej przestrzeni można przeprowadzać operację próbkowania z niej punktów w sposób celowy lub losowy oraz mapowania ich w przestrzeni obrazu, co pozwala na generowanie nowych obrazów (patrz rysunki 8.9 i 8.10).



**Rysunek 8.9.** Trenowanie niejawnej wektorowej przestrzeni obrazów i używanie jej do próbkowania nowych obrazów



**Rysunek 8.10.** Ciągła przestrzeń twarzy wygenerowana przez Toma White'a przy użyciu koderów VAE

Sieci GAN i kodery VAE to dwie różne strategie trenowania niejawnych przestrzeni reprezentacji obrazów. Każda z nich ma swoje charakterystyki. Kodery VAE doskonale nadają się do trenowania niejawnych przestrzeni, które mają wyraźne struktury — przestrzeni, w których kierunki są osiami o określonym znaczeniu. Sieci GAN generują obrazy, które mogą wyglądać bardzo realistycznie, ale niejawną przestrzeń, z której są one próbkowane, może nie posiadać tak wyraźnej struktury i ciągłości.

#### **8.4.2. Wektory koncepcyjne używane podczas edycji obrazu**

O ideę wektorów koncepcyjnych otarliśmy się w rozdziale 6. przy okazji opisywania tworzenia osadzeń słów: w niejawnej przestrzeni reprezentacji lub przestrzeni osadzeń kierunki mogą służyć do kodowania osi zmiany oryginalnych danych. W niejawnej przestrzeni obrazów twarzy może istnieć np. **wektor uśmiechu**  $s$  — wektor taki, że jeżeli punkt  $z$  przestrzeni reprezentuje pewien obraz twarzy, to punkt  $z + s$  reprezentuje tę samą twarz, która się uśmiecha. Po zidentyfikowaniu takiego wektora możemy edytować obrazy, podążając w określonym kierunku niejawnej przestrzeni. Wektory koncepcyjne mogą odwoływać się do dowolnego wymiaru wariacji przestrzeni obrazu — w przypadku obrazów twarzy można odkryć wektory dodające okulary przeciwsłoneczne, usuwające okulary z twarzy, zamieniające twarz mężczyzny w twarz kobiety itd. Na rysunku 8.11 przedstawiono przykład wektora uśmiechu opracowanego przy użyciu koderów VAE wytrenowanych na zbiorze danych zdjęć twarzy znanych osób (zbiorze CelebA) przez Toma White'a z nowozelandzkiej uczelni Victoria University School of Design.

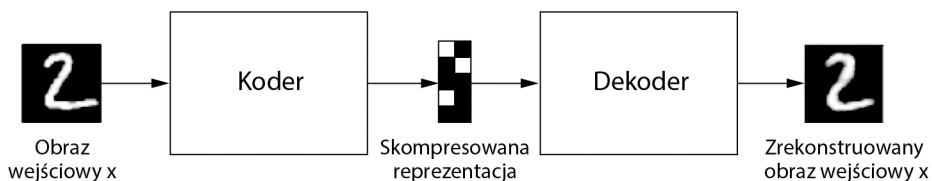


Rysunek 8.11.  
Wektor uśmiechu

### 8.4.3. Wariacyjne autoenkodery

Wariacyjne autoenkodery zostały opracowane jednocześnie przez Kingmę i Wellinga w grudniu 2013 r.<sup>6</sup> i Rezende, Mohameda i Wierstrę w styczniu 2014 r.<sup>7</sup>. Są to generatywne modele sprawdzające się szczególnie w zadaniach edycji obrazu przy użyciu wektorów koncepcyjnych. Wariacyjne autoenkodery to nowoczesne podejście do autoenkoderów — sieci, która ma na celu zakodowanie danych wejściowych w postaci niskopoziomowej niejawnej przestrzeni, a następnie ich dekodowanie — jest to połączenie uczenia głębokiego z wnioskowaniem bayesowskim.

Klasyczny autoenkoder obrazu przetwarza obraz wejściowy, mapuje go na niejawną przestrzeń wektorową z zastosowaniem modułu kodera, a następnie dekoduje go do postaci wejściowej o takich samych wymiarach jak obraz oryginalny przy użyciu modułu dekodera (patrz rysunek 8.12). Autoenkoder jest trenowany tak, aby mógł dokonać rekonstrukcji obrazów wejściowych. Nakładając różne ograniczenia na wyjście kodera, można zmusić autoenkoder do uczenia się interesujących nas niejawnych reprezentacji danych. Zwykle kod ma być niskopoziomowy i rzadki (powinien zawierać głównie zera). W takim przypadku koder działa tak, jakby kompresował dane wejściowe do postaci formy składającej się z kilku bitów informacji.



Rysunek 8.12. Autoenkoder przypisujący obraz wejściowy  $x$  do skompresowanej reprezentacji, a następnie dekodujący go do zrekonstruowanej postaci obrazu  $x$

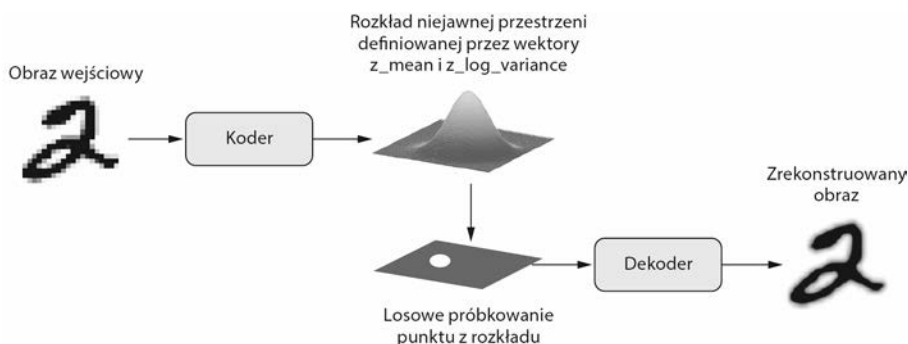
W praktyce takie klasyczne autoenkodery nie pozwalają na uzyskanie szczególnie przydatnej przestrzeni o ładnej strukturze. Nie są one również zbyt wydajne w roli mechanizmów kompresji danych. W związku z tym wyszły z użycia. Technika kodowania VAE

<sup>6</sup> Diederik P. Kingma i Max Welling, *Auto-Encoding Variational Bayes*, arXiv, 2013, <https://arxiv.org/abs/1312.6114>.

<sup>7</sup> Danilo Jimenez Rezende, Shakir Mohamed i Daan Wierstra, *Stochastic Backpropagation and Approximate Inference in Deep Generative Models*, arXiv, 2014, <https://arxiv.org/abs/1401.4082>.

usprawniła działanie autoenkoderów, dodając do nich nieco magii statystyki, dzięki której są one w stanie uczyć się ciągłych przestrzeni charakteryzujących się określoną strukturą. W ten sposób powstało solidne narzędzie służące do generowania obrazów.

Koder VAE zamiast kompresować obraz wejściowy do określonej formy kodu niejawniej przestrzeni, zamienia obraz w parametry rozkładu statystycznego: średnią i wariancję. Oznacza to założenie, że obraz wejściowy został wygenerowany przez proces statystyczny i podczas kodowania i dekodowania należy wziąć pod uwagę losowość tego procesu. Koder VAE korzysta następnie z parametrów średniej i wariancji w celu losowego próbkowania jednego elementu rozkładu i zdekodowania go z powrotem do oryginalnej postaci (patrz rysunek 8.13). Stochastyczność tego procesu poprawia jego siłę i zmusza niejawną przestrzeń do zapisywania wszędzie reprezentacji mających znaczenie: każdy punkt próbkowany w tej przestrzeni jest dekodowany do postaci poprawnego obiektu wejściowego.



**Rysunek 8.13.** Koder VAE mapuje obraz na dwa wektory:  $z\_mean$  i  $z\_log\_variance$ , które definiują rozkład prawdopodobieństwa w niejawniej przestrzeni używanej do próbkowania dekodowanego punktu

Z technicznego punktu widzenia koder VAE działa w następujący sposób:

1. Moduł kodera zamienia próbki wejściowe `input_img` na dwa parametry niejawniej przestrzeni reprezentacji:  $z\_mean$  i  $z\_log\_variance$ .
2. Punkt  $z$  jest losowo próbkowany z niejawnego rozkładu normalnego, co ma doprowadzić do wygenerowania obrazu wejściowego za pomocą działania  $z = z\_mean + \exp(z\_log\_variance) * \epsilon$ , gdzie  $\epsilon$  jest losowym tensorem o małych wartościach.
3. Moduł dekodera mapuje ten punkt w niejawniej przestrzeni z powrotem na formę oryginalnego obrazu.

Współczynnik  $\epsilon$  przyjmuje wartość losową, a więc proces zapewnia to, że każdy punkt zbliżony w niejawniej przestrzeni do punktu, w którym zakodowano obraz `input_img(z-mean)`, po rozkodowaniu będzie wyglądał podobnie do obrazu `input_img` (niejawna przestrzeń będzie miała charakter sensowny i ciągły). Po zdekodowaniu dowolnych dwóch zbliżonych do siebie punktów niejawniej przestrzeni uzyskamy bardzo podobne do siebie obrazy. Ciągłość w połączeniu z małą liczbą wymiarów niejawniej

przestrzeni sprawia, że każdy kierunek tej przestrzeni tworzy oś zmienności danych o konkretnym znaczeniu — niejawną przestrzeń ma charakter wysoce ustrukturyzowany i łatwo poruszać się w niej przy użyciu wektorów koncepcji.

Parametry kodera VAE są trenowane przy użyciu dwóch funkcji straty: **straty rekonstrukcji**, która wymusza dopasowanie dekodowanych próbek do obrazów wejściowych, i **straty regularyzacji**, która wspiera tworzenie niejawnych przestrzeni o poprawnej formie, a także umożliwia zmniejszenie nadmiernego dopasowania do treningowego zbioru danych.

Przeanalizujemy szybko implementację kodera VAE w pakiecie Keras. Schematycznie wygląda ona tak:

```

c(z_mean, z_log_variance) %>% encoder(input_img) ← Kodowanie obrazu wejściowego za pomocą
                                                    parametrów średniej i wariancji.
z <- z_mean + exp(z_log_variance) * epsilon ← Wyciąganie punktu z przestrzeni przy
                                                    użyciu małej losowej wartości epsilon.
reconstructed_img <- decoder(z) ← Dekodowanie obrazu.

model <- keras_model(input_img, reconstructed_img) ← Tworzenie instancji modelu
                                                    autoenkodera mapującego obraz
                                                    wejściowy na jego rekonstrukcję.

```

Model jest następnie trenowany z wykorzystaniem dwóch funkcji straty: straty rekonstrukcji i straty regularyzacji.

Poniższy kod pokazuje sieć kodera mapującą obrazy na parametry rozkładu prawdopodobieństwa umieszczone w przestrzeni o niejawnym charakterze. W praktyce jest to prosta sieć konwolucyjna przypisująca obraz wejściowy  $x$  do dwóch wektorów:  $z\_mean$  i  $z\_log\_var$ .

#### Listing 8.23. Sieć kodera VAE

```

library(keras)

img_shape <- c(28, 28, 1)
batch_size <- 16
latent_dim <- 2L ← Liczba wymiarów niejawnej przestrzeni:
                  pracujemy z przestrzenią dwuwymiarową.

input_img <- layer_input(shape = img_shape)

x <- input_img %>%
  layer_conv_2d(filters = 32, kernel_size = 3, padding = "same",
                activation = "relu") %>%
  layer_conv_2d(filters = 64, kernel_size = 3, padding = "same",
                activation = "relu", strides = c(2, 2)) %>%
  layer_conv_2d(filters = 64, kernel_size = 3, padding = "same",
                activation = "relu") %>%
  layer_conv_2d(filters = 64, kernel_size = 3, padding = "same",
                activation = "relu")

shape_before_flattening <- k_int_shape(x)

x <- x %>%
  layer_flatten() %>%

```



```
layer_dense(units = 32, activation = "relu")

z_mean <- x %>%
  layer_dense(units = latent_dim)
z_log_var <- x %>%
  layer_dense(units = latent_dim)
```

**Obraz wejściowy jest końcowo zapisywany w formie tych dwóch parametrów.**

Oto kod pozwalający na użycie parametrów rozkładu statystycznego `z_mean` i `z_log_var`, które z założenia mają pozwalać na utworzenie obrazu `input_img` w celu wygenerowania punktu z niejawnej przestrzeni. Część kodu R korzystającego z zaplecza pakietu Keras obudowujemy warstwą `layer_lambda`. W Keras wszystko musi być warstwą, a więc kod, który nie należy do wbudowanej warstwy, powinien mieć formę warstwy `layer_lambda` lub innej samodzielnie zdefiniowanej warstwy.

**Listing 8.24. Funkcja próbkowania niejawnej przestrzeni**

```
sampling <- function(args) {
  c(z_mean, z_log_var) %<-% args
  epsilon <- k_random_normal(shape = list(k_shape(z_mean)[1], latent_dim),
                              mean = 0, stddev = 1)
  z_mean + k_exp(z_log_var) * epsilon
}

z <- list(z_mean, z_log_var) %>%
  layer_lambda(sampling)
```

Poniższy fragment kodu przedstawia implementację dekodera. Wektor `z` jest modyfikowany tak, aby uzyskać wymiary obrazu, a następnie używanych jest kilka warstw konwolucyjnych w celu wygenerowania ostatecznej postaci obrazu wyjściowego mającego takie same wymiary jak oryginalny obraz `input_img`.

**Listing 8.25. Sieć dekodera VAE mapująca punkty niejawnej przestrzeni na obrazy**

```
decoder_input <- layer_input(k_int_shape(z)[-1]) ← Wejście wektora z.
```

```
x <- decoder_input %>%
  layer_dense(units = prod(as.integer(shape_before_flattening[-1])),
              activation = "relu") %>%
  layer_reshape(target_shape = shape_before_flattening[-1]) %>%
```

**Zwiększanie rozdzielczości obiektu wejściowego.**

**Zmiana kształtu wektora w celu uzyskania map cech o takim samym kształcie jak kształt mapy cech przed ostatnią warstwą flatten modułu kodującego.**

```
layer_conv_2d_transpose(filters = 32, kernel_size = 3, padding = "same",
                       activation = "relu", strides = c(2, 2)) %>%
layer_conv_2d(filters = 1, kernel_size = 3, padding = "same",
              activation = "sigmoid")
```

**Uzyskanie mapy cech o takim samym rozmiarze jak nieprzetworzone dane wejściowe**

**Warstwy używane w celu odekodowania wektora z do formy mapy cech o takim samym rozmiarze jak oryginalny obraz wejściowy.**

```
decoder <- keras_model(decoder_input, x) ← Tworzenie instancji modelu dekodera zamieniającego obiekt decoder_input na zdekodowany obraz.
```

```
z_decoded <- decoder(z) ← Przyjmuje wektor z i zwraca jego zdekodowaną postać.
```

Dualizm funkcji straty kodera VAE nie wpasowuje się w tradycyjne ramy funkcji próbującej w formie `loss(input, target)`. W związku z tym zdefiniujemy dodatkową warstwę, która będzie wewnętrznie korzystać z metody `add_loss` w celu wygenerowania wartości straty.

**Listing 8.26. Definicja warstwy używanej do obliczania wartości straty kodera VAE**

```
library(R6)

CustomVariationalLayer <- R6Class("CustomVariationalLayer",
  inherit = KerasLayer,

  public = list(

    vae_loss = function(x, z_decoded) {
      x <- k_flatten(x)
      z_decoded <- k_flatten(z_decoded)
      xent_loss <- metric_binary_crossentropy(x, z_decoded)
      kl_loss <- -5e-4 * k_mean(
        1 + z_log_var - k_square(z_mean) - k_exp(z_log_var),
        axis = -1L
      )
      k_mean(xent_loss + kl_loss)
    },

    call = function(inputs, mask = NULL) {
      x <- inputs[[1]]
      z_decoded <- inputs[[2]]
      loss <- self$vae_loss(x, z_decoded)
      self$add_loss(loss, inputs = inputs)
      x
    }
  )
)

layer_variational <- function(object) {
  create_layer(CustomVariationalLayer, object, list())
}

y <- list(input_img, z_decoded) %>%
  layer_variational()
```

← **Własne warstwy implementuje się, pisząc metodę wywołującą.**

← **Nie korzystamy z tych zwracanych danych, ale warstwa musi coś zwracać.**

**Obudowuje klasę R6, nadając jej postać standardowej funkcji warstwy Keras.**

**Wywołujemy własną warstwę na obiekcie wejściowym i odcodowanym obiekcie wyjściowym w celu wygenerowania ostatecznego obiektu generowanego przez model.**

Teraz możemy utworzyć instancję modelu i ją wytrenować. Wartością straty zajęliśmy się w utworzonej ręcznie warstwie, a więc nie musimy określać zewnętrznej funkcji straty w czasie kompilacji (`loss=NULL`), co z kolei oznacza, że nie będziemy przekazywać docelowych danych w czasie trenowania (do funkcji `fit()` modelu przekazujemy tylko argument `x_train`).

**Listing 8.27. Trenowanie kodera VAE**

```
vae <- keras_model(input_img, y)

vae %>% compile(
  optimizer = "rmsprop",
```

```

    loss = NULL
  )
  mnist <- dataset_mnist()
  c(c(x_train, y_train), c(x_test, y_test)) %<-% mnist

  x_train <- x_train / 255
  x_train <- array_reshape(x_train, dim =c(dim(x_train), 1))

  x_test <- x_test / 255
  x_test <- array_reshape(x_test, dim =c(dim(x_test), 1))

  vae %>% fit(
    x = x_train, y = NULL,
    epochs = 10,
    batch_size = batch_size,
    validation_data = list(x_test, NULL)
  )

```

Po wytrenowaniu modelu na zbiorze MNIST możemy użyć sieci decoder w celu wygenerowania obrazów na podstawie dowolnej niejawnej przestrzeni wektorów.

**Listing 8.28. Próbki siatki punktów z niejawnej dwuwymiarowej przestrzeni i dekodowanie ich w celu wygenerowania obrazów**

```

n <- 15
digit_size <- 28 | Wyświetlamy siatkę 15x15 cyfr (łącznie 255 cyfr).

```

**Transformacja liniowych współrzędnych przy użyciu funkcji qnorm w celu wygenerowania wartości niejawnej zmiennej z (pracujemy z przestrzenią Gaussa).**

```

grid_x <- qnorm(seq(0.05, 0.95, length.out = n))
grid_y <- qnorm(seq(0.05, 0.95, length.out = n))

op <- par(mfrow = c(n, n), mar = c(0,0,0,0), bg = "black")
for (i in 1:length(grid_x)) {
  yi <- grid_x[[i]]
  for (j in 1:length(grid_y)) {
    xi <- grid_y[[j]]
    z_sample <- matrix(c(xi, yi), nrow = 1, ncol = 2)
    z_sample <- t(replicate(batch_size, z_sample, simplify = "matrix"))
    x_decoded <- decoder %>% predict(z_sample, batch_size = batch_size)
    digit <- array_reshape(x_decoded[1,..], dim = c(digit_size, digit_size))
    plot(as.raster(digit))
  }
}
par(op)

```

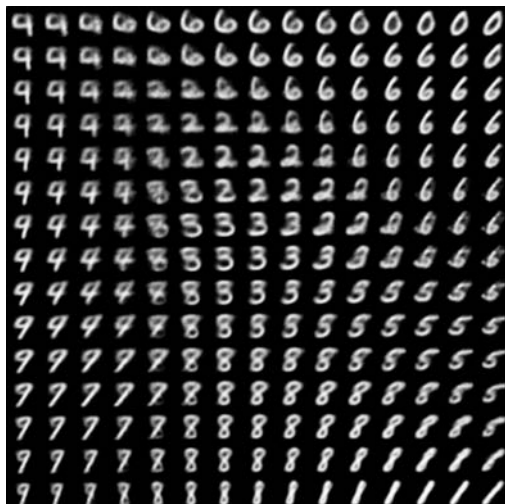
**Zwielokrotnianie obiektu z w celu uzyskania pełnego wsadu.**

**Tworzenie obrazów na podstawie wsadu.**

**Zmienia kształt pierwszej cyfry wsadu z 28x28x1 na 28x28.**

Wygenerowana siatka cyfr (patrz rysunek 8.14) pokazuje całkowitą ciągłość rozkładu różnych klas cyfr — na kolejnych obrazach widać, że cyfry stopniowo przechodzą w siebie. Kierunki w tej przestrzeni mają znaczenie: podążając w jednym z wybranych kierunków, otrzymujemy obraz przypominający bardziej cyfrę 4, a podrażając w innym otrzymujemy obraz przypominający bardziej cyfrę 1 itd.

W kolejnym podrozdziale opiszę następną narzędzie służące do generowania sztucznych obrazów: generatywne sieci z przeciwnikiem (sieci GAN).



**Rysunek 8.14.** Siatka cyfr rozkodowana na podstawie niejawnej przestrzeni

#### 8.4.4. Wnioski

- Generowanie obrazów za pomocą technik uczenia głębokiego przebiega poprzez uczenie modeli niejawnych przestrzeni odzwierciedlających statystyczne informacje o zbiorze danych zawierającym obrazy. Próbując i rozkodowując punkty z tej przestrzeni, możemy wygenerować nowe obrazy. Można to robić za pomocą dwóch głównych technik: koderów VAE i sieci GAN.
- Kodery VAE tworzą wysoce ustrukturyzowaną, ciągłą przestrzeń reprezentacji. W związku z tym doskonale nadają się do edycji obrazów: zamieniania twarzy, dodawania lub usuwania uśmiechu itd. Ponadto sprawdzają się również podczas generowania animacji opartych na niejawnej przestrzeni — animacji pokazujących stopniowe przeobrażanie się jednego obrazu w inny.
- Sieci GAN umożliwiają generowanie realistycznie wyglądających obrazów, ale nie korzystają z ciągłej przestrzeni o solidnej strukturze.

Większość mechanizmów generowania obrazów, które widziałem, są oparte na koderach VAE, ale sieci GAN są dość popularne wśród naukowców, a przynajmniej było tak w latach 2016 – 2017. W kolejnym podrozdziale opiszę ich działanie i implementację.

**WSKAZÓWKA** Jeżeli chcesz pobawić się jeszcze mechanizmem generowania obrazów, to polecam Ci korzystanie ze zbioru danych Largescale Celeb Faces Attributes (CelebA). Jest on dostępny za darmo i zawiera ponad 200 000 portretowych zdjęć gwiazd, które doskonale nadają się do eksperymentowania z wektorami koncepcyjnymi. Pracuje się z nim o wiele lepiej niż ze zbiorem MNIST.

## 8.5. Wprowadzenie do generatywnych sieci z przeciwnikiem

Generatywne sieci z przeciwnikiem (sieci GAN) zostały opracowane w 2014 r. przez zespół kierowany przez Iana Goodfellowa<sup>8</sup> jako alternatywa dla koderów VAE. Sieci te pozwalają na generowanie dość realistycznie wyglądających obrazów poprzez wymuszenie tego, żeby pod względem parametrów statystycznych sztucznie wygenerowane obrazy były praktycznie nie do odróżnienia od prawdziwych zdjęć.

Intuicyjnie działanie sieci GAN można porównać do czynności podejmowanych przez fałszerza próbującego podrobić obraz Picassa. Na początku fałszerz nie posiada najlepszych umiejętności. Miesza niektóre ze swoich podróbek z oryginalnymi obrazami Picassa i pokazuje je wszystkim osobie zajmującej się sprzedażą dzieł sztuki, która ocenia autentyczność każdego z obrazów i udziela fałszerzowi informacji zwrotnej na temat tego, co sprawia, że dany obraz wygląda tak, jakby namalował go Picasso. Fałszerz wraca do swojej pracowni i przygotowuje kolejne fałszyfikaty. Wraz z upływem czasu będzie on coraz lepiej imitował styl Picassa, a sprzedawca będzie coraz lepiej dostrzegał podróbki. Na koniec obie osoby będą dysponowały doskonałymi podróbkami obrazów Picassa.

Tak właśnie działają sieci GAN: składają się z sieci fałszerza i sieci eksperta. Każda z nich jest trenowana tak, aby działała lepiej od drugiej. Sieć GAN składa się z dwóch części:

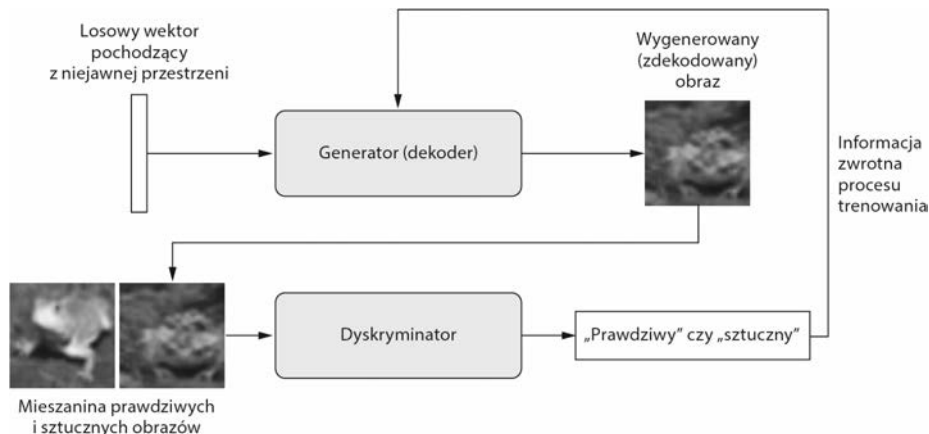
- **sieci generatora** — sieci przyjmującej na wejściu losowy wektor (losowy punkt niejawnej przestrzeni) i dekodującej go w celu wygenerowania syntetycznego obrazu;
- **sieci dyskryminatora (sieci przeciwnika)** — sieci przyjmującej na wejściu obraz (prawdziwy lub sztucznie wygenerowany) i określającej to, czy obraz pochodzi z treningowego zbioru danych, czy został wygenerowany przez sieć generatora.

Sieć generatora jest trenowana tak, aby mogła oszukać sieć dyskryminatora, a więc wraz z postępem procesu trenowania będzie generować coraz bardziej realistyczne obrazy — obrazy te będą praktycznie nie do odróżnienia od obrazów rzeczywistych z punktu widzenia dyskryminatora (patrz rysunek 8.15), a sieć dyskryminatora będzie w tym czasie stale dostosowywać się do coraz lepszych efektów pracy generatora, zwiększając poziom realizmu generowanych obrazów. Po zakończeniu trenowania generator jest w stanie zamienić dowolny punkt swojej przestrzeni wejściowej w realistyczny obraz. W przeciwieństwie do koderów VAE ta niejawna przestrzeń nie jest ciągła i nie musi być tak łatwa w interpretacji.

Warto zwrócić uwagę na to, że sieć GAN jest pierwszym rozwiązaniem przedstawionym w tej książce, w którym minimum optymalizacji nie jest czymś ustalonym. W standardowej sytuacji algorytm spadku gradientowego śledzi funkcję straty, której kolejne wartości nie wpływają w dużym stopniu na otrzymywane wyniki, a w przypadku sieci GAN każda zmiana wartości straty powoduje niewielką modyfikację wszystkiego. To dynamiczny system, w którym proces optymalizacji nie szuka minimum, ale równowagi

---

<sup>8</sup> Ian J. Goodfellow i inni, *Generative Adversarial Networks*, arXiv, 2014, <https://arxiv.org/abs/1406.2661>.



**Rysunek 8.15.** Generator zamienia losowe wektory niejawnej przestrzeni w obrazy, a dyskryminator stara się odróżnić prawdziwe obrazy od tych, które zostały wygenerowane; generator jest trenowany w celu oszukania dyskryminatora

między dwoma siłami. W związku z tym sieci GAN są bardzo trudne do trenowania. Uzyskanie działającej sieci GAN wymaga dokładnego dostrajania architektury modelu i parametrów jego trenowania. Na rysunku 8.16 przedstawiono efekty działania sieci GAN.



**Rysunek 8.16.** Obrazy wyciągnięte z niejawnej przestrzeni przez sieć GAN; zostały wygenerowane przez Mike'a Tykę przy użyciu wieloetapowej sieci GAN trenowanej na zbiorze danych ze zdjęciami twarzy (<http://www.miketyka.com/>)

### 8.5.1. Schematyczna implementacja sieci GAN

W tej sekcji wyjaśnię implementację najprostszej formy sieci GAN w pakiecie Keras. Sieci GAN są zaawansowane, a więc zagłębianie się w techniczne szczegóły wykraczałoby poza zakres tematyczny tej książki. Zaprezentuję implementację **głębokiej konwolucyjnej sieci GAN (DCGAN)** — sieci GAN, w której generator i dyskryminator są głębokimi sieciami konwolucyjnymi. W praktyce zastosuję warstwę `layer_conv_2d_transpose` w celu zwiększenia próbkowania w generatorze.

Sieć GAN będzie trenowana na zbiorze CIFAR10 składającym się z 50 000 kolorowych obrazów o rozdzielczości  $32 \times 32$ , podzielonych na 10 równych klas (w każdej z klas znajduje się 5000 obrazów). Dla ułatwienia będziemy korzystać tylko z obrazów należących do klasy „żaba”.

Schematycznie działanie tej sieci GAN można przedstawić w następujący sposób:

1. Sieć generatora (generator) mapuje wektory o kształcie (latent\_dim,) na obrazy o kształcie (32, 32, 3).
2. Sieć dyskryminatora (discriminator) mapuje obrazy o kształcie (32, 32, 3) na binarną wartość określającą prawdopodobieństwo tego, że obraz jest prawdziwy.
3. Sieć gan tworzy łańcuch składający się z generatora i dyskryminatora: gan(x) <- discriminator(generator(x)). Sieć gan mapuje wektory niejawniej przestrzeni na oceny realizmu wystawiane przez dyskryminator.
4. Trenujemy dyskryminator przy użyciu przykładów prawdziwych i sztucznych obrazów oznaczonych etykietami, tak jakbyśmy trenowali zwykły model klasyfikacji obrazów.
5. W celu wytrenowania generatora korzystamy z gradientów wag generatora w odniesieniu do straty modelu gan. W związku z tym każdy krok trenowania ma modyfikować wagi generatora tak, aby zwiększyć prawdopodobieństwo zaklasyfikowania wygenerowanych obrazów jako prawdziwych. Innymi słowy, trenujemy generator tak, aby był w stanie oszukać dyskryminator.

### 8.5.2. Zbiór przydatnych rozwiązań

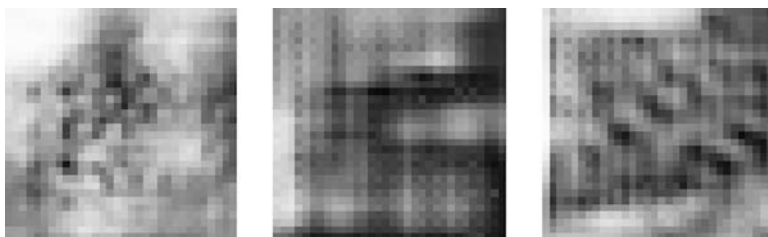
Proces trenowania sieci GAN i dostrajania ich implementacji jest bardzo trudny. W związku z tym warto poznać rozwiązania ułatwiające pracę z tymi sieciami. Rozwiązania te mają naturę heurystyczną i nie są teoretycznymi wskazówkami — podobnie jak z większością zagadnień uczenia głębokiego, mamy do czynienia bardziej z alchemią niż fizyką. Mają one pomóc w zrozumieniu bieżącego problemu. Są sprawdzone w działaniu, ale nie nadają się do każdego kontekstu.

Oto kilka rozwiązań zastosowanych w zaprezentowanej w tym podrozdziale implementacji generatora i dyskryminatora GAN. Nie jest to lista wszystkich możliwych rozwiązań pomocniczych. Jeżeli zainteresował Cię ten temat, to zajrzyj do książek poświęconych sieciom GAN.

- Ostatnią warstwą aktywacji modelu jest tanh, a nie warstwa sigmoid spotykana w większości innych modeli.
- Próbkowanie punktów z niejawniej przestrzeni dokonujemy przy użyciu **rozkładu normalnego** (rozkładu Gaussa), a nie rozkładu jednorodnego.
- Stochastyczność przyczynia się do uzyskania bardziej solidnego modelu. Trenowanie sieci GAN przyczynia się do powstania dynamicznej równowagi, a więc proces ten może utknąć w wielu punktach. Wprowadzanie losowości do procesu trenowania pomaga temu zapobiec. Losowość wprowadzamy na dwa sposoby: korzystając z mechanizmu odrzucania zaimplementowanego w dyskryminatorze i poprzez dodanie losowego szumu do etykiet przetwarzanych przez dyskryminator.
- Rzadkie gradienty mogą przeszkodzić w trenowaniu sieci GAN. W uczeniu głębokim rzadki charakter danych jest często czymś wręcz pożądanym, ale nie dotyczy to sieci GAN. Do powstawania rzadkich gradientów mogą przyczynić się dwie rzeczy: operacje maxpooling i aktywacje ReLU. Zamiast operacji maxpooling polecam

stosowanie krokowych konwolucji w celu zmniejszenia objętości próbek, a zamiast aktywacji ReLU polecam stosowanie warstwy `layer_activation_leaky_relu`. Działa ona podobnie do warstwy ReLU, ale nie posiada tak dużych ograniczeń — pozwala na pojawianie się niewielkich ujemnych wartości aktywacji.

- W wygenerowanych obrazach często pojawiają się artefakty wyglądające jak szachownica (patrz rysunek 8.17). Powstają one w wyniku nierównego pokrycia przestrzeni pikseli w generatorze. W celu rozwiązania tego problemu, za każdym razem, gdy będziemy korzystał z kroku `layer_conv_2d_transpose` lub `layer_conv_2d`, zastosujemy rozmiar jądra podzielny przez rozmiar kroku (dotyczy to generatora i dyskryminatora).



**Rysunek 8.17.** Artefakty przypominające swym wyglądem szachownice; są wywołane przez brak korelacji między rozmiarem kroku a rozmiarem jądra w pokryciu przestrzeni pikseli; jest to jeden z wielu problemów spotykanych podczas pracy z sieciami GAN

### 8.5.3. Generator

Zacznijmy od opracowania modelu generator zamieniającego wektor pochodzący z niejawnej przestrzeni (podczas trenowania będzie on próbkowany losowo) w obraz. Jednym z typowych problemów spotykanych podczas pracy z sieciami GAN jest stałe generowanie obrazów wyglądających jak szum. Można to rozwiązać, stosując technikę odrzucania w implementacjach dyskryminatora i generatora.

#### Listing 8.29. Generator sieci GAN

```
library(keras)

latent_dim <- 32
height <- 32
width <- 32
channels <- 3

generator_input <- layer_input(shape = c(latent_dim))

generator_output <- generator_input %>%
  layer_dense(units = 128 * 16 * 16) %>%
  layer_activation_leaky_relu() %>%
  layer_reshape(target_shape = c(16, 16, 128)) %>%
  layer_conv_2d(filters = 256, kernel_size = 5,
```

**Zamiana obiektu wejściowego w 128-kanalową mapę cech o wymiarach 16x16.**



```

padding = "same") %>%
layer_activation_leaky_relu() %>%

layer_conv_2d_transpose(filters = 256, kernel_size = 4,
                        strides = 2, padding = "same") %>%
layer_activation_leaky_relu() %>%

layer_conv_2d(filters = 256, kernel_size = 5,
              padding = "same") %>%
layer_activation_leaky_relu() %>%
layer_conv_2d(filters = 256, kernel_size = 5,
              padding = "same") %>%
layer_activation_leaky_relu() %>%

layer_conv_2d(filters = channels, kernel_size = 7,
              activation = "tanh", padding = "same")

generator <- keras_model(generator_input, generator_output)

```

**Zwiększenie rozmiaru do 32x32.**

**Generuje jednokanałową mapę cech o rozmiarze 32x32 (rozmiar ten jest taki sam jak rozmiar obrazów wchodzących w skład zbioru CIFAR10).**

**Tworzy instancję generatora, która mapuje obiekt wejściowy o kształcie (latent\_dim) na obraz o kształcie (32, 32, 3).**

#### 8.5.4. Dyskryminator

Teraz możemy przystąpić do pracy nad modelem discriminator, który przyjmuje na swoim wejściu obraz (prawdziwy lub sztuczny) i klasyfikuje go do jednej z dwóch klas: „obraz wygenerowany” lub „obraz pochodzący z treningowego zbioru danych”.

**Listing 8.30. Dyskryminator sieci GAN**

```

discriminator_input <- layer_input(shape = c(height, width, channels))

discriminator_output <- discriminator_input %>%
  layer_conv_2d(filters = 128, kernel_size = 3) %>%
  layer_activation_leaky_relu() %>%
  layer_conv_2d(filters = 128, kernel_size = 4, strides = 2) %>%
  layer_activation_leaky_relu() %>%
  layer_conv_2d(filters = 128, kernel_size = 4, strides = 2) %>%
  layer_activation_leaky_relu() %>%
  layer_conv_2d(filters = 128, kernel_size = 4, strides = 2) %>%
  layer_activation_leaky_relu() %>%
  layer_flatten() %>%

  layer_dropout(rate = 0.4) %>%
  layer_dense(units = 1, activation = "sigmoid")

discriminator <- keras_model(discriminator_input, discriminator_output)

discriminator_optimizer <- optimizer_rmsprop(
  lr = 0.0008,
  clipvalue = 1.0,

```

**Warstwa odrzucania. To bardzo ważne rozwiązanie.**

**Warstwa klasyfikacji.**

**Tworzenie instancji modelu dyskryminatora zamieniającego obiekt wejściowy mający kształt (32, 32, 3) na wynik klasyfikacji binarnej określającej prawdziwość obrazu.**

**Optymalizator korzysta z mechanizmu ucinania wartości gradientu.**

```

decay = 1e-8)
)

discriminator %>% compile(
  optimizer = discriminator_optimizer,
  loss = "binary_crossentropy"
)

```

← **W celu uzyskania stabilnego przebiegu procesu trenowania korzystamy z parametru rozkładu współczynnika uczenia.**

### 8.5.5. Sieć z przeciwnikiem

Teraz czas skonfigurować sieć GAN, która łączy generator z dyskriminatorem. Po wytrenowaniu model ten pchnie generator w kierunku usprawniającym oszukiwanie dyskriminatora. Model ten zamienia punkty niejawnej przestrzeni w etykiety klasyfikacji: „prawdziwy” lub „sztuczny” i ma być trenowany na etykietach zawsze wskazujących prawdziwość obrazu. W związku z tym trenowanie modelu gan doprowadzi do modyfikacji wartości wag generatora tak, aby zwiększyć prawdopodobieństwo orzeczenia przez dyskriminator analizujący sztuczne obrazy tego, że są one prawdziwe. Podczas trenowania dyskriminator powinien być zamrożony (nie należy go trenować) — w czasie trenowania modelu gan wagi dyskriminatora nie będą modyfikowane. Gdyby wagi dyskriminatora były modyfikowane podczas tego procesu, to trenowalibyśmy dyskriminator tak, aby zawsze przewidywał prawdziwość obrazu, a przecież nie tego chcemy!

#### Listing 8.31. Sieć przeciwników

```

freeze_weights(discriminator)
)

gan_input <- layer_input(shape = c(latent_dim))
gan_output <- discriminator(generator(gan_input))
gan <- keras_model(gan_input, gan_output)

gan_optimizer <- optimizer_rmsprop(
  lr = 0.0004,
  clipvalue = 1.0,
  decay = 1e-8
)

gan %>% compile(
  optimizer = gan_optimizer,
  loss = "binary_crossentropy"
)

```

← **Uniemożliwia trenowanie wag dyskriminatora (tylko w modelu gan).**

### 8.5.6. Trenowanie sieci DCGAN

Teraz możemy rozpocząć proces trenowania. Oto lista czynności wykonywanych podczas każdej epoki trenowania (tak właśnie powinna działać pętla trenująca model):

1. Wybierz losowe punkty z niejawnej przestrzeni (losowy szum).
2. Użyj generatora w celu wygenerowania obrazów zawierających losowy szum.
3. Połącz wygenerowane obrazy z prawdziwymi.

4. Wytrenuj dyskryminator przy użyciu wylosowanych obrazów z etykietami określającymi prawdziwość obrazów.
5. Wybierz kolejne losowe punkty z niejawnej przestrzeni.
6. Trenuj model gan w tym celu, aby wszystkie obrazy były uznawane przez dyskryminator za prawdziwe. W tym procesie zmodyfikowane zostaną wagi generatora (podczas trenowania modelu gan wagi dyskryminatora są zamrożone), tak aby zwiększyć prawdopodobieństwo tego, że wygenerowane obrazy zostaną uznane przez dyskryminator za prawdziwe — generator jest trenowany tak, żeby był w stanie oszukać dyskryminator.

Czas zaimplementować ten mechanizm.

#### Listing 8.32. Implementacja trenowania modelu GAN

```

cifar10 <- dataset_cifar10()                                     ← Ładowanie zbioru danych CIFAR10.
c(c(x_train, y_train), c(x_test, y_test)) %<-% cifar10

x_train <- x_train[as.integer(y_train) == 6,..]                ← Wybór obrazów żab (klasa numer 6).
x_train <- x_train / 255                                       ← Normalizacja danych.

iterations <- 10000
batch_size <- 20
save_dir <- 'twój_folder' ← Miejsce zapisu wygenerowanych obrazów.

start <- 1
for (step in 1:iterations) {
  random_latent_vectors <- matrix(rnorm(batch_size * latent_dim),
                                  nrow = batch_size, ncol = latent_dim)
  generated_images <- generator %>% predict(random_latent_vectors)
  stop <- start + batch_size - 1
  real_images <- x_train[start:stop,..]
  rows <- nrow(real_images)
  combined_images <- array(0, dim = c(rows * 2, dim(real_images)[-1]))
  combined_images[1:rows,..] <- generated_images
  combined_images[(rows+1):(rows*2),..] <- real_images
  labels <- rbind(matrix(1, nrow = batch_size, ncol = 1),
                  matrix(0, nrow = batch_size, ncol = 1))
  labels <- labels + (0.5 * array(runif(prod(dim(labels))),
                                  dim = dim(labels)))
  d_loss <- discriminator %>% train_on_batch(combined_images, labels)
  random_latent_vectors <- matrix(rnorm(batch_size * latent_dim),
                                  nrow = batch_size, ncol = latent_dim)
}

```

**Dekodowanie punktów w celu wygenerowania sztucznych obrazów.**

**Próbkowanie losowych punktów z niejawnej przestrzeni.**

**Łączenie obrazów sztucznych z prawdziwymi.**

**Tworzenie etykiet umożliwiających odróżnienie obrazów prawdziwych od sztucznych.**

**Ważny zabieg: wprowadzanie losowego szumu do etykiet.**

**Trenowanie dyskryminatora.**

**Losowe próbkowanie punktów w niejawnej przestrzeni.**

```

misleading_targets <- array(0, dim = c(batch_size, 1))
| Tworzenie fałszywych etykiet
| stwierdzających oryginalność
| wszystkich obrazów.

a_loss <- gan %>% train_on_batch(
  random_latent_vectors,
  misleading_targets
)
| Trenowanie generatora przy użyciu modelu gan
| i zamrożeniu wag dyskryminatora.

start <- start + batch_size
if (start > (nrow(x_train) - batch_size))
  start <- 1

if (step %% 100 == 0) {
  | Okazjonalny zapis obrazów.

  save_model_weights_hdf5(gan, "gan.h5")
  | Zapis wag modelu.

  cat("strata dyskryminatora w kroku :", d_loss, "\n")
  cat("strata przeciwna:", a_loss, "\n")
  | Wyświetlanie metryk.

  image_array_save(
    generated_images[1,,] * 255,
    path = file.path(save_dir, paste0("generated_frog", step, ".png"))
  )
  | Zapis jednego
  | wygenerowanego
  | obrazu.

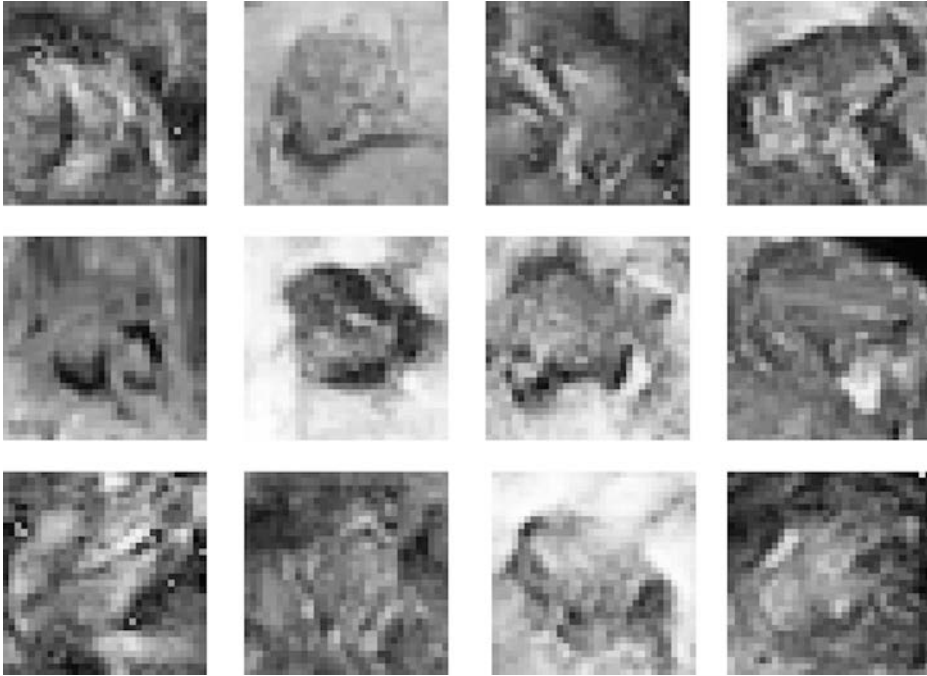
  image_array_save(
    real_images[1,,] * 255,
    path = file.path(save_dir, paste0("real_frog", step, ".png"))
  )
  | Zapis jednego
  | prawdziwego obrazu
  | w celach
  | porównawczych.
}
}

```

Podczas trenowania można zaobserwować duży wzrost przeciwnej straty przy stracie dyskryminacyjnej zbliżonej do zera — generator może zostać zdominowany przez dyskryminator. W takim przypadku należy zmniejszyć wartość współczynnika uczenia dyskryminatora i zwiększyć wartość współczynnika mechanizmu odrzucania zaimplementowanego w dyskryminatorze. Przyjrzyj się rysunkowi 8.18, aby zrozumieć problemy, jakim sprostać musi dyskryminator.

### 8.5.7. Wnioski

- Sieć GAN składa się z sieci generatora sprzężonej z siecią dyskryminatora. Dyskryminator jest trenowany do odróżniania obrazów wygenerowanych przez generator od prawdziwych obrazów pochodzących z zewnętrznego zbioru. Generator jest natomiast trenowany w celu coraz lepszego oszukiwania dyskryminatora. Generator nigdy nie widzi bezpośrednio obrazów wchodzących w skład treningowego zbioru danych — dysponuje tylko informacjami przekazywanymi przez dyskryminator.
- Trenowanie sieci GAN jest trudne, ponieważ jest to proces dynamiczny i nie stosuje się w nim prostego algorytmu spadku gradientowego. Poprawne zaimplementowanie procesu trenowania sieci GAN wymaga stosowania wielu heurystycznych rozwiązań, a także dokładnego dostrajania parametrów.



**Rysunek 8.18.** Pobaw się w dyskryminator: w każdej kolumnie znajdują się dwa obrazy wygenerowane przez sieć GAN i jeden obraz pochodzący z treningowego zbioru danych. Czy możesz odróżnić je od siebie? (Poprawne odpowiedzi: prawdziwe obrazy w kolejnych kolumnach umieszczono na środku, u góry, u dołu i na środku)

- Sieci GAN mogą potencjalnie wygenerować bardzo realistyczne obrazy, ale w przeciwieństwie do koderów VAE tworzona przez nie niejawna przestrzeń nie ma uporządkowanej ciągłej struktury, a więc nie nadaje się do niektórych praktycznych zastosowań, takich jak edycja obrazów przy użyciu wektorów koncepcyjnych.

## 8.6. Podsumowanie rozdziału

- Techniki uczenia głębokiego mogą być używane w wielu kreatywnych zastosowaniach wykraczających poza nadawanie etykiet — można z nich korzystać w celu generowania różnych treści. W tym rozdziale opisałem:
  - Generowanie kolejnych elementów sekwencji danych. Technika ta sprawdza się podczas generowania tekstu, muzyki (nuta po nucie), a także innych danych mających formę szeregu czasowego.
  - Działanie algorytmu DeepDream (maksymalizowanie aktywacji warstwy konwolucyjnej przez wzrost gradientu przestrzeni wejściowej).
  - Przeprowadzanie operacji transferu stylu (łączenie treści jednego obrazu ze stylem drugiego obrazu w celu wygenerowania ciekawych efektów wizualnych).

- Sieci GAN i kodery VAE, a także używanie tych technik w celu generowania nowych obrazów. Ponadto poruszyłem zagadnienia związane z używaniem wektorów koncepcyjnych podczas edycji obrazów.
- To zaledwie kilka technik należących do szybko rozwijającej się dziedziny. Istnieje jeszcze wiele innych rozwiązań — generatywne uczenie głębokie to dziedzina zasługująca na przedstawienie w odrębnej książce.

# Skorowidz

---

## A

abstrakcja, 347  
abstrakcyjne modele, 339  
aktywacja, 169  
algorytm, 40  
    DeepDream, 290–296  
    Grad-CAM, 183  
    lasów losowych, 35  
    LSTM, 38, 211, 285  
    propagacji wstecznej, 28, 66, 343  
    spadku gradientowego, 252, 303  
    stochastycznego spadku  
        wzdłuż gradientu, 64, 176  
    walidacji k-składowej, 102  
analiza obrazu, 137  
anatomia sieci neuronowej, 72  
antropomorfizacja modeli, 337  
API, 78  
architektura sieci, 45, 330  
augmentacja danych, 151, 153  
autoenkodery, 306, 308

## B

baza konwolucyjna, 158  
    jednowymiarowa, 240  
błąd przewidywań, 110  
brzytwa Ockhama, 121  
budowa sieci neuronowej, 147

## C

całkowita strata wariacji, 301  
cchiwe próbkowanie, 282  
chmura, 80  
    AWS, 359

## D

dane  
    docelowe, 110  
    objętościowe, 331  
    obrazy, 52  
    pogodowe, 215  
    sekwencyjne, 51, 52, 331  
    szeregu czasowego, 51, 52, 215  
    tekstowe, 188  
    warunkujące, 282  
    wektorowe, 51, 330  
    wideo, 53  
    wyjściowe, 110  
DeepDream, 290–296  
definiowanie tensora straty, 175  
destylacja danych, 45  
dopasowanie słabe, 118  
dopełnianie, 140  
dostrajanie, 155, 163  
drzewo decyzyjne, 35  
dwukierunkowe  
    rekurencyjne sieci neuronowe, 228  
    warstwy rekurencyjne, 214  
dynamiczne dostrajanie wartości, 261  
dyskryminator sieci GAN, 319  
działanie  
    algorytmu DeepDream, 293  
    sieci konwolucyjnej, 136, 139  
    uczenia głębokiego, 27  
dźwięk, 330

## E

ekstrakcja cech, 155, 159, 168  
    z augmentacją danych, 161  
entropia krzyżowa, 86  
etykieta, 44, 46, 110

ewaluacja  
jednowymiarowej sieci konwolucyjnej, 236  
modelu, 222, 225

## F

filtrowanie grafiki, 175

funkcja

compile(), 46, 68  
generator, 218  
str(), 45  
wizualizacji kanału, 171

funkcje

aktywacji, 40, 86  
aktywacji ostatniej warstwy, 128  
celu, 28  
ciągłe, 61  
gładkie, 62  
jądra, 34  
krzywizna, 63  
minimum lokalne, 65  
próbujące, 286  
różniczkowalne, 62  
straty, 28, 46, 74, 97, 128

funkcjonalny interfejs API, 247, 251

## G

GAN, generative adversarial network, 306, 315, 322

generator

danych, 240  
sieci GAN, 318  
wsadów, 150

generatywne

sieci rekurencyjne, 281  
sieci z przeciwnikiem, GAN, 306, 315

generowanie

danych, 279  
danych sekwencyjnych, 282  
obrazów, 306  
przewidywań, 90, 96, 170  
siatki wzorców, 178  
tekstu, 281, 285, 287  
wykresów, 150, 161  
wykresów charakterystyki modelu, 223  
zdjęć, 152

gęste

połączenie, 45  
próbkowanie, 339

głębokość uczenia głębokiego, 26

głęboka

konwolucyjna sieć GAN, 316  
sieć neuronowa, 27

gradient, 61, 62

mini-batch, 64  
straty, 176

gradientowe wzmacnianie maszyn, 35

grafy, 248

skierowane acykliczne, 254  
warstw, 246, 254

granice decyzyjne, 34

## H

haszowanie z gorącą jedynką, 191

hiperparametry modelu, 111, 272

historia uczenia maszynowego, 32

## I

idea

śniącej maszyny, 281  
transferu stylu, 297

iloczyn tensorowy, 55

implementacja

algorytmu DeepDream, 291  
algorytmu LSTM, 285  
jednowymiarowej sieci konwolucyjnej, 235  
neuronowego transferu stylu, 299  
rekurencyjnej sieci neuronowej, 204  
sieci GAN, 316  
trenowania modelu GAN, 321

incepcja, 254

ekstremalna, 256

instalowanie pakietu Keras, 77, 353, 364

interfejs

API, 247  
programistyczny pakietu Keras, 246

interpretacja geometryczna

operacji tensorowych, 58  
uczenia głębokiego, 59

inwestycje, 40

iteracyjna walidacja k-krotna, 127



*J*

jądro konwolucji, 138  
 jednoetykietowa klasyfikacja kategorialna, 331  
 jednostka ukryta, 83  
 jednowymiarowe sieci konwolucyjne, 187, 241

*K*

Keras, 75  
   instalowanie pakietu, 77  
   uruchamianie pakietu, 79  
 klasa, 44, 110  
 klasyfikacja  
   binarna, 110, 331  
   kategorialna, 332  
   wieloetykietowa, 110  
   wieloklasowa, 91, 110  
 klasyfikator, 160  
 kodery VAE, 314  
 kodowanie  
   kategorialne, 93  
   słów, 189  
 konfiguracja  
   algorytmu DeepDream, 292  
   algorytmu spadku gradientowego, 303  
   optymalizacji, 128  
 konwersja zbioru danych, 202  
 konwolucja  
   głębokości, 270  
   punktowa, 255  
 konwolucyjne sieci neuronowe, 134, 167,  
 185, 234  
 kroki procesu konwolucji, 140  
 krzywa ROC, 127

*L*

lasy losowe, 35  
 losowa inicjalizacja, 60  
 losowanie kolejności próbek, 114  
 LSTM, Long Short Term Memory, 38

*Ł*

łączenie  
   danych sekwencyjnych, 235  
   pochodnych, 66  
   sieci konwolucyjnych i rekurencyjnych, 237

*M*

macierz, 48  
   Gram, 298  
   osadzeń słów, 199  
   transpozycja, 58  
 maksymalizacja  
   marginesu, 34  
   straty, 176  
 mapa  
   ciepła aktywacji klasy, 184  
   odpowiedzi filtra, 138  
 mapowanie  
   danych szeregów czasowych, 335  
   danych wektorowych, 335  
   materiału wideo, 336  
   na dane wektorowe, 335  
   obrazów  
   na obrazy, 336  
   na tekst, 336  
   tekstu  
   na obrazy, 336  
   na tekst, 335  
 maszyny wzmacniane gradientowo, 35  
 materiały wideo, 51  
 metoda  
   gorącej jedyńki, 189  
   plot(), 89  
 metody jądrowe, 33  
 metryki, 46  
   trenowania, 150, 213  
   walidacji, 213  
 model, 326  
   jako program, 342  
   języka, 282, 289  
   klasyfikacji tekstu, 264  
   pełniący funkcję warstw, 259  
   sekwencyjny, 246  
   wielowejściowy, 251  
   z wieloma wejściami, 249  
   z wieloma wyjściami, 247, 251, 253  
 modelowanie probabilistyczne, 32  
 moduł Inception, 247, 254  
 modułowe procedury składowe, 345  
 moduły  
   algorytmiczne, 346  
   geometryczne, 346

modyfikowanie obrazów, 290  
 monitorowanie  
   metryk modelu, 266  
   modeli, 260

## N

naddatek danych, 114  
 nadmierne dopasowanie, 47, 89, 118, 129,  
 168, 225  
 narzędzie TensorBoard, 260, 264  
 neuronowy transfer stylu, 297  
 n-gramy, 188  
 niejawna przestrzeń obrazów, 306  
 normalizacja  
   danych, 218  
   gradientu, 176  
   wartości, 115  
   wsadu, 269

## O

obrazy, 51, 52, 330  
 obróbka cech, 36  
 obsługa  
   etykiet, 97  
   tensorów R, 50  
 odkładanie danych, 127  
 odrzucanie rekurencyjne, 214  
 odwrotne różniczkowanie, 66  
 ograniczenia uczenia głębokiego, 336  
 operacja  
   max-pooling, 141  
   relu, 54  
 operacje tensorowe, 53, 55  
   interpretacja geometryczna, 58  
 operator  
   potokowy, 67  
   przypisania wielokrotnego, 82  
 optymalizacja, 118  
   gradientowa, 60  
   hiperparametru, 272  
 optymalizator, 46, 65, 69, 74  
 osadzanie słów, 192, 197  
   trenowane wcześniej, 196  
 oś czasu, 114

## P

pakiet  
   Keras, 75, 353  
   TensorFlow, 264  
 parametr warstwy, 28  
 parsowanie pliku  
   osadzeń, 198  
   tekstowego, 285  
 percepcja, 326  
 pętla trenowania, 28, 60  
 pobieranie  
   danych, 144  
   osadzeń słów, 198  
 pochodna  
   funkcji, 61  
   operacji tensorowej, 62  
 pojemność pamięci, 119  
 połączenia szczałkowe, 256  
 porzucanie, 123, 124  
 prawda, 110  
 problem  
   prognozowania temperatury, 214  
   zaniku gradientu, 209  
 procedury numeryczne BLAS, 54  
 procesor graficzny, 80  
   EC2, 359  
 prognozowanie temperatury, 214  
 propagacja  
   gradientu, 40  
   wsteczna, 66  
 próbka, 44  
   danych wejściowych, 110  
 próbkowanie, 282, 306  
   niejawnej przestrzeni, 311  
   siatki punktów, 313  
   stochastyczne, 283  
 przepływ roboczy, 125  
   uczenia maszynowego, 329  
 przestrzeń hipotez, 26, 86, 330  
   możliwości, 74, 334  
 przetwarzanie  
   cech, 116  
   mapy ciepła, 183  
   obrazu, 133  
   sekwencji, 234  
   tekstu i sekwencji, 187

tensora na obraz, 177  
zdjęcia, 170  
przygotowywanie  
danych, 127, 217  
generatorów, 220  
punkt odniesienia, 220, 223

## R

redukcja rozmiaru sieci, 119  
regresja, 99  
skalarna, 110  
wektora ciągłych wartości, 332  
wektorowa, 110  
regularyzacja wag, 121  
rekurencyjna maska odrzucania, 225  
rekurencyjne  
porzucanie, 225  
sieci neuronowe, 187, 203, 242, 334  
reprezentacja danych, 47, 114  
rozkład  
normalny, 317  
prawdopodobieństwa, 94, 284  
różniczkowalność, 61, 62  
różniczkowanie symboliczne, 66

## S

schemat  
inicjacji wag, 40  
modułu Inception, 255  
optymalizacji, 40  
sieci neuronowe, 26, 35, 328  
anatomia, 72  
głębokie, *Patrz także* uczenie głębokie  
tworzenie, 276  
konwolucyjne, 36, 134, 167, 185, 234, 330, 333  
dodawanie klasyfikatora, 162  
dostrajanie, 155, 163  
działanie, 136  
ekstrakcja cech, 155, 159, 161  
implementacja, 235  
jednowymiarowe, 187, 235, 241  
klasyfikacja, 135  
o separowalnej głębokości, 333  
trenowanie, 135, 143  
tworzenie, 147

wizualizacja efektów uczenia, 168  
wizualizacja filtrów, 175  
wstępna obróbka danych, 148  
wytrenowane uprzednio, 155  
z warstwą odrzucania, 153  
zamrażanie bazy, 162  
zapisywanie modelu, 154  
optymalizacja gradientowa, 60  
rekurencyjne, 187, 203, 242, 334  
dwukierunkowe, 228  
reprezentacja danych, 47  
samonormalizujące się, 270  
warstwa, 45, 73  
sieć  
dekodera VAE, 311  
DCGAN, 316, 320  
dyskryminatora, 315  
GAN, 306, 315, 322  
generatora, 315  
gęsto połączona, 330, 331  
kodera VAE, 310  
LSTM, 281  
silnik sieci neuronowych, 60  
skalar, 48, 252  
skalowanie  
max-pooling, 141  
obrazu, 293  
w górę, 129  
modeli, 274  
słabe dopasowanie, 118  
spadek gradientowy, 65  
sterowanie procesem trenowania modelu, 260  
stochastyczny spadek wzdłuż gradientu, 63  
stos warstw rekurencyjnych, 226  
strata, 69  
regularyzacji, 310  
rekonstrukcji, 310  
stylu, 298, 301  
treści, 298, 301  
wariacji, 301  
suma dwóch wektorów, 59  
synteza programów, 342  
systemy eksperckie, 31  
szczątkowe połączenia, 247  
szeregi czasowe, 330  
sztuczka jądra, 34  
sztuczna inteligencja, 22, 31, 326

## Ś

środowisko RStudio Server, 359

## T

tekst, 188, 330

tensor, 48

czterowymiarowy, 53

krojenie, 50

kształt, 49

liczba osi, 49

operacje, 53

oś próbek, 50

oś wsadu, 51

pięciowymiarowy, 48

straty, 175

trójwymiarowy, 49

typ danych, 49

zmiana kształtu, 57

test Turinga, 23

token, 188

tokenizacja tekstu, 198

transfer stylu, 297, 303

transpozycja macierzy, 58

trenowanie, 60, 68

dwukierunkowej warstwy

GRU, 232

LSTM, 231

jednowymiarowej sieci konwolucyjnej, 236

klasyfikatora, 160

kodera VAE, 312

konwolucyjnej sieci neuronowej, 143

modelu, 87, 200, 222–227

modelu języka, 286

sieci DCGAN, 320

sieci konwolucyjnej, 135

tworzenie

punktów kontrolnych, 261

stosów warstw rekurencyjnych, 214

wywołań zwrotnych, 262

## U

Ubuntu

instalowanie pakietu Keras, 353

uczenie częściowo nadzorowane, 109

uczenie

częściowo nadzorowane, 109

głębokie, 24, 29, 36, 187, 326

działanie, 27

generowanie danych, 279

głębia, 26

interpretacja geometryczna, 59

monitorowanie modeli, 260

najlepsze praktyki, 245

ograniczenia, 336

prostota, 42

skalowalność, 42

stacja robocza, 79

uruchamianie w chmurze, 80

wąskie gardła, 257

wielokrotne stosowanie, 42

zanik gradientów, 258

maszynowe, 22, 32, 37, 107, 221, 326

model programowania, 23

uniwersalny przepływ roboczy, 125

zautomatyzowane, 344

nadzorowane, 108

nienadzorowane, 108

osadzeń słów, 193

plytkie, 26

przez wzmacnianie, 109

udostępnianie wag warstwy, 258

uogólnianie

ekstremalne, 339

lokalne, 339

uruchamianie pakietu Keras, 79

## W

waga warstwy, 28, 60, 73, 258, 326

walidacja, 87, 94, 102–104

k-krotna, 127

krzyżowa, 113

z losowaniem, 114

krzyżowa, 101

na odłożonych danych, 112

wariacyjne autoenkodery, 306, 308

wariancja, 101

warstwa, 45, 72, 326

embedding, 194, 195, 199

GRU, 209, 225, 227, 240

LSTM, 209, 210, 212, 230

warstwy  
 gęsto połączone, 331  
 konwolucyjne, 235, 255, 332  
 pośrednie, 97  
 rekurencyjne, 73, 206, 226  
 różniczkowalne, 343  
 wczesne  
 sieci neuronowe, 33  
 zatrzymywanie, 261  
 wczytywanie obrazów, 149  
 wektor, 48  
 pięciowymiarowy, 48  
 uśmiechu, 308  
 wektory  
 koncepcyjne, 307  
 słów, 192  
 wektoryzacja  
 danych, 115  
 tekstu, 188  
 wideo, 53, 331  
 wiedza  
 modelu, 326  
 sieci, 73  
 wizualizacja  
 danych, 264  
 działania biblioteki TensorFlow, 268  
 efektów uczenia, 168  
 filtrów, 175, 177  
 kanału, 171  
 map ciepła, 181  
 osadzeń słów, 267  
 pośrednich aktywacji, 169

worki słów, 189  
 wsad danych, 50, 110  
 współczynnik porzucania, 123  
 współdzielona sieć LSTM, 258  
 wstępna obróbka obrazu, 182  
 wstępne przetwarzanie osadzeń, 198  
 wydajność modelu, 127, 200  
 wymiar  
 próbek, 50  
 wsadu, 51  
 wymiarowość, 48  
 wywołania zwrotne, 260, 261  
 wzmacnianie gradientowe, 35  
 wzorce filtrów warstwy, 179

## Z

zamrażanie warstwy, 162  
 zapisywanie  
 metryk trenowania, 261  
 modelu, 150  
 zastosowania  
 rekurencyjnych sieci neuronowych, 214  
 zbiory  
 testowe, 45, 111  
 treningowe, 45, 111  
 walidacyjne, 111  
 zbiór danych  
 Agencji Reutera, 91  
 danych IMDB, 81  
 MNIST, 44  
 zima sztucznej inteligencji, 30  
 zmiana układu współrzędnych, 25

## *Notatki*

# PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —

1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA  
**Helion** 

**W ostatnich latach byliśmy świadkami** ogromnego postępu technik sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz uczenia głębokiego. Konsekwencje tego błyskawicznego rozwoju są odczuwalne w niemal każdej dziedzinie. Wydaje się, że to jedna z tych technologii, które powinny być dostępne dla jak najszerszej grupy ludzi. Dopiero wtedy uczenie głębokie wykorzysta w pełni swój potencjał i stanie się prawdziwym impulsem rozwoju naszej cywilizacji. Co prawda na pierwszy rzut oka ta niesamowita technologia może wydawać się wyjątkowo skomplikowana i trudna do zrozumienia, warto jednak wykorzystać dostępne narzędzia, takie jak biblioteka Keras i język R, aby implementować mechanizmy uczenia głębokiego wszędzie tam, gdzie okażą się przydatne.

**Ta książka jest znakomitym przewodnikiem** po technikach uczenia głębokiego. Poza wyczerpująco przedstawionymi podstawami znajdziesz tu zasady implementacji tych technik z wykorzystaniem języka R i biblioteki Keras. Dzięki przystępnym wyjaśnieniom i praktycznym przykładom szybko zrozumiesz nawet bardziej skomplikowane zagadnienia uczenia głębokiego. Poznasz koncepcje i dobre praktyki związane z tworzeniem mechanizmów analizy obrazu, przetwarzania języka naturalnego i modeli generatywnych. Przeanalizujesz ponad 30 przykładów kodu uzupełnionego dokładnymi komentarzami. W efekcie szybko przygotujesz się do korzystania z uczenia głębokiego w celu rozwiązania konkretnych problemów.

### **W tej książce między innymi:**

- podstawowe koncepcje sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego i uczenia głębokiego
- wprowadzenie do budowy i trenowania sieci neuronowych
- uczenie głębokie w przetwarzaniu obrazów
- modele generatywne tworzące obrazy i tekst
- perspektywy i ograniczenia uczenia głębokiego

### **Uczenie głębokie: zafascynuj się i zaimplementuj!**

**François Chollet** zajmuje się uczeniem głębokim w firmie Google. Jest twórcą biblioteki Keras, a także współtwórcą pakietu TensorFlow. Zajmuje się również rozwojem technik uczenia głębokiego związanych z przetwarzaniem obrazu oraz procesami logicznego myślenia.

**J.J. Allaire** jest twórcą zintegrowanego środowiska programistycznego RStudio. Opracował interfejsy pozwalające na stosowanie pakietów Keras i TensorFlow podczas pracy w R.

**Helion** 

 [helion.pl](http://helion.pl)

 **HELION SA**  
ul. Kościuszki 1c  
44-100 Gliwice  
tel.: 32 230 98 63  
helion@helion.pl

*Sprawdź nasze szkolenia!*

**SZKOLENIA**



**AKADEMIA IT & BUSINESS**

[WWW.SZKOLENIA.HELION.PL](http://WWW.SZKOLENIA.HELION.PL)

**KOD KORZYŚCI**  
Sięgnij po więcej! ▶



ISBN 978-83-283-4780-9



9 788328 347809

**INFORMATYKA W NAJLEPSZYM WYDANIU**

Cena: 77,00 zł