



УКРАЇНА

(19) UA (11) 33321 (13) U
(51) МПК (2006)
G06G 7/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДВОНАПРЯМЛЕНОЇ АНАЛОГО-ДИСКРЕТНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

1

2

(21) u200800804

(22) 23.01.2008

(46) 10.06.2008, Бюл.№ 11, 2008 р.

(72) ДМИТРИЄНКО ВАЛЕРІЙ ДМИТРІЙОВИЧ, UA,
ЗАКОВОРОТНИЙ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ, UA,
РОМАНОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ, UA

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", UA

(57) Пристрій двонапрямленої аналого-дискретної асоціативної пам'яті, що утворений на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ), складається із двох сенсорних шарів нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані двонапрямленими зваженими збуджуючими зв'язками з усіма елементами розпізнавального шару модуля, що являє собою дискретну нейронну мережу АРТ-1 і містить у собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого зв'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару бінарними двонапрямленими збуджуючими зв'язками, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого зв'язані з кожним з елементів в інтерфейсному шарі двонапрямленими зваженими збуджуючими зв'язками з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, зв'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару та гальмуючими вихідними зв'язками з елементами розпізнавального шару і вхідними гальмуючими - із елементами інтерфейсного шару, і керуючі нейрони, перший серед яких зв'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару та вихідними збуджуючими зв'язками з елементами інтерфейсного шару і гальмуючими вхідними - із елементами розпізнавального шару, а другий зв'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного та вихідними збуджуючими зв'язками з усіма елементами розпізнавального шару, і третій керуючий нейрон зв'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма нейрона-

ми проміжного шару та активізуючими вихідними зв'язками із іншими двома керуючими нейронами, який відрізняється тим, що в нього введено другий модуль, що складається із двох однотипних паралельно працюючих підмодулів, кожний з яких являє собою модифіковану безперервну нейронну мережу АРТ-2 і які зв'язані між собою за допомогою двонапрямлених збуджуючих зв'язків між елементами розпізнавальних шарів і відповідними елементами загального розпізнавального шару, елементи якого, у свою чергу, зв'язані збуджуючими двонапрямленими зв'язками із кожним елементом проміжного шару між модулями, а також вихідними збуджуючими зв'язками від елементів розпізнавального шару першого підмодуля до відповідних елементів розпізнавального шару другого підмодуля, одночасно із цим підмодулі містять у собі шари інтерфейсних елементів, нейрони яких зв'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів безперервними вихідними збуджуючими зв'язками, а також із кожним елементом у відповідних їм розпізнавальних шарах двонапрямленими збуджуючими зваженими зв'язками з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальні нейрони, які зв'язані збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсних шарів, гальмуючими вихідними - із елементами розпізнавальних шарів і збуджуючими вихідними із загальним вирішальним нейроном, що, у свою чергу, зв'язаний гальмуючими вихідними зв'язками із усіма елементами загального розпізнавального шару і із елементами розпізнавального шару першого підмодуля, а також нормуючі нейрони, що зв'язані вхідними збуджуючими безперервними зв'язками з усіма елементами сенсорних шарів, вхідними гальмуючими зв'язками із керуючим нейроном та збуджуючими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсних шарів другого модуля нейронної мережі.

Корисна модель належить до обчислювальної техніки, зокрема до області побудови автоматизованих систем керування, а саме до напрямку побудови систем діагностики й керування складними технічними об'єктами.

Корисна модель може бути використаний при побудові системи керування або діагностики такого складного технічного об'єкта як трифазний асинхронний тяговий електропривод.

(19) UA (11) 33321 (13) U

Відомий пристрій асоціативної пам'яті містить основний шар асоціативних нейронів, які в процесі навчання асоціюють зображення-збудження, що поступають на асоціативні входи із зображеннями-відгуками на понятійних входах. Крім того в пристрої є спеціальні нейрони-селектори, призначені для вибору за певним критерієм вихідного сигналу на виходах асоціативних нейронів на етапі розпізнавання асоціативних зображень, і накопичувальні нейрони для формування з послідовних у часі вхідних сигналів паралельні образи, що надходять на паралельні асоціативні входи асоціативних нейронів [1].

Недоліком цього пристрою є те, що даний пристрій асоціативної пам'яті працює тільки в одному напрямку, тобто може асоціювати запам'ятовані зображення-відгуки із зображеннями-збудженнями, але не навпаки, і фактично відновлює відповідні зображення по зашумленим асоціативним образам.

Відомий пристрій асоціативної пам'яті являє собою дискретну нейронну мережу Хопфілда, що одержала назву двонапрямленої асоціативної пам'яті й складається із двох сенсорних шарів елементів, нейрони яких зв'язані між собою зваженими двонапрямленими зв'язками із відповідними ваговими коефіцієнтами. Поширення сигналів у мережі відбувається у двох напрямках: від входу до виходу і назад синхронно, доти, поки в мережі не встановиться стан рівноваги при досягненні енергії мережі локального мінімуму, при цьому забезпечується зважений характер зв'язків, і формуються матриці двонапрямлених зв'язків, що дозволяє використати відомий пристрій для двостороннього відновлення асоціацій з пам'яті пристрою (нейронної мережі). Крім того в даному пристрої уведено додаткові нейрони в обидва шари, які збільшують розмірність мережі й коректують неточності функціонування зв'язків при виникненні помилок [2].

Незважаючи на те, що даний аналог має значно краще якість розпізнавання асоціативних образів і характеристики двонапрямленої асоціативної пам'яті в цілому, а також відновлює зображення в обох напрямках, залишається багато недоліків, серед яких - неможливість донавчання нейронної мережі в процесі функціонування і не здатність відокремлювати нові образи від перевернутих або зашумлених відомих образів, крім того існує ситуація, коли при навчанні мережі деякою навчальною парою зображень енергія мережі не може досягти локального мінімуму, а відповідно дана навчальна пара не може бути розпізнана мережею, навіть якщо на вхід поданий незашумлений вихідний образ. Ще одним недоліком пристрою є те, що нейронна мережа погано розпізнає зображення якщо в процесі навчання подібним до вхідних асоціювали різко відмінні вихідні зображення.

Найбільш близьким до заявленого пристрою є пристрій двонапрямленої асоціативної пам'яті перестроюваний шляхом введення в його структуру двох модулів на основі дискретних нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ) і проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані двонапрямленими зваженими зв'язками із відповідними їм елементами розпізнавальних ша-

рів, двох однотипних паралельно працюючих модулів, кожний з яких являє собою дискретну нейронну мережу адаптивної резонансної теорії [3].

Використання мереж адаптивної резонансної теорії в прототипі дозволило досягти здатність додаткового навчання двонапрямленої асоціативної пам'яті в процесі її функціонування. Це стає можливим завдяки тому, що нейронні мережі адаптивної резонансної теорії відносять вхідне зображення до одного з відомих класів зображень, якщо воно є достатньо подібне або резонує із прототипом цього класу. Якщо знайдений прототип з певною точністю, що задається спеціальним параметром подібності, відповідає вхідному зображенню, то в режимі навчання він модифікується, щоб стати більше схожим на пред'явлене зображення, а в режимі розпізнавання залишається в активному стані відповідний розпізнавальний нейрон. Коли вхідне зображення недостатньо подібно жодному з наявних прототипів, то на його основі й у режимі навчання і в режимі розпізнавання створюється прототип нового класу. Це можливо завдяки наявності в мережі великої кількості надлишкових нейронів, які не використовуються доти, поки в цьому немає необхідності. Отже, нові образи можуть запам'ятовуватися мережею без перевертання вже запам'ятованої раніше інформації. Крім того, нейронні мережі адаптивної резонансної теорії відрізняються здатністю відокремлювати нові образи від перевернутих або зашумлених відомих образів.

Головним недоліком прототипу є те, що даний пристрій двонапрямленої асоціативної пам'яті може працювати тільки з дискретними зображеннями, а значить не може бути використаний для запам'ятовування або відновлення безперервних зображень.

Завдання корисної моделі - розробка пристрою двонапрямленої асоціативної пам'яті, що володіє можливістю розпізнавання і запам'ятовування безперервних та дискретних зображень.

Завдання вирішується завдяки тому, що пристрій двонапрямленої асоціативної пам'яті, перебудовується так, що являє собою нейронну мережу, яка складається із двох сенсорних шарів нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані двонапрямленими зваженими збуджуючими зв'язками з усіма елементами розпізнавального шару модуля, що являє собою дискретну нейронну мережу АРТ-1 і містить у собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару бінарними двонапрямленими збуджуючими зв'язками, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого зв'язані з кожним з елементів в інтерфейсному шарі двонапрямленими зваженими збуджуючими зв'язками з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, пов'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару та гальмуючими вихідними зв'язками з елементами розпізнавального шару і вхідними гальмуючими - із елементами інтерфейсного шару, керуючі нейрони, перший серед яких пов'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару та вихідними збуджуючими зв'язками з елементами інтерфейсного шару і га-

льмуючими вхідними - із елементами розпізнавального шару, а другий пов'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного та вихідними збуджуючими зв'язками з усіма елементами розпізнавального шару, і третій керуючий нейрон пов'язаний збуджуючими вхідними зв'язками з усіма нейронами проміжного шару та активізуючими вихідними зв'язками із іншими двома керуючими нейронами, і відрізняється тим, що в нього введено другий модуль, що складається із двох однопоточних паралельно працюючих підмодулів, кожний з яких являє собою модифіковану безперервну нейронну мережу АРТ-2 і пов'язані між собою за допомогою двонапрямлених збуджуючих зв'язків між елементами розпізнавальних шарів і відповідними елементами загального розпізнавального шару, елементи якого у свою чергу пов'язані збуджуючими двонапрямленими зв'язками із кожним елементом проміжного шару між модулями, а також вихідними збуджуючими зв'язками від елементів розпізнавального шару першого підмодуля до відповідних елементів розпізнавального шару другого підмодуля, одночасно із цим, підмодулі містять у собі шари інтерфейсних елементів, нейрони яких пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів безперервними вихідними збуджуючими зв'язками, а також із кожним елементом у відповідних їм розпізнавальних шарах двонапрямленими збуджуючими зваженими зв'язками з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальні нейрони, які зв'язані збуджуючими вхідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсних шарів, гальмуючими вихідними - із елементами розпізнавальних шарів і збуджуючими вихідними із загальним вирішальним нейроном, що у свою чергу зв'язаний гальмуючими вихідними зв'язками із усіма елементами загального розпізнавального шару і із елементами розпізнавального шару першого підмодуля, а також нормуючі нейрони, що зв'язані вхідними збуджуючими безперервними зв'язками з усіма елементами сенсорних шарів, вхідними гальмуючими зв'язками із керуючим нейроном та збуджуючими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсних шарів другого модуля нейронної мережі.

Корисна модель ілюструється рисунком, на якому наведена схема пристрою двонапрямленої асоціативної пам'яті розробленої на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії.

Двонапрямлена асоціативна пам'ять, побудована на основі безперервних і дискретної нейронних мереж АРТ, складається із двох паралельно працюючих модулів, один із яких являє собою нейронну мережу АРТ-2Д, а інший - нейронну мережу АРТ-1. До складу модулів M_1 і M_2 входять сенсорні шари елементів, відповідно S^1_i та S^2_i , які в режимі навчання приймають пари асоціативних вхідних зображень $(S^{11}, S^{21}), (S^{12}, S^{22}), \dots, (S^{1q}, S^{2q})$. Елементи сенсорних S-шарів модулів M_1 і M_2 передають вхідні зображення інтерфейсним нейронам Z^1_i, Z^2_i і Z^3_i ($i=1, \dots, n$; $l=1, \dots, k$), відповідно модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі. Поряд із встановленням значень нейронів інтерфейсних Z-шарів модулів M_{11}, M_{12} і M_2 , іде також активізація керуючих G_1, G_2 нейронів модуля M_2 , вирішальних R^1 і R^2 нейронів модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

Елементи інтерфейсних шарів Z^1_i, Z^2_i і Z^3_i ($i=1, \dots, n$; $l=1, \dots, k$) пов'язані з елементами розпізнавальних шарів Y^1_j, Y^2_j і Y^3_g ($j=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$), відповідно модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі. З'єднання між елементами інтерфейсних і розпізнавальних шарів здійснюється зваженими зв'язками з ваговими коефіцієнтами $b^1_{ij}, b^2_{ij}, t^1_{ji}, t^2_{ji}$ ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$) і V^1_{lg}, V^2_{gl} ($l=1, \dots, k$; $g=1, \dots, m$), відповідно для M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі. У модулях M_1, M_{12} і M_2 шари Y^1_j, Y^2_j і Y^3_g ($j=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$) є шарами нейронів, що змагаються, у яких кожний елемент може перебувати в одному із трьох станів: активному, неактивному, загальмованому. Під час розпізнавання вхідних зображень в результаті змагання у кожному модулі нейронної мережі залишається активним тільки один нейрон розпізнавального шару Y^1_j, Y^2_j і Y^3_g у відповідних їм шарах Y^1_i, Y^2_i і Y^3_g ($j=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$) модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі. За допомогою вирішальних нейронів R_1, R_2 і R^2 , відповідно модулів M_{11}, M_{12} і M_2 , визначаються параметри подібності p^1_1, p^1_2 і p^2 , відповідно для модулів M_{11}, M_{12} і M_2 , а за допомогою нейрона R^1 модуля M_1 , визначається загальний параметр подібності p^1 модуля M_1 нейронної мережі. Нейроном R^2 можуть загальмовуватися нейрони Y-шару модуля M_2 , у випадку не виконання умови відповідності вхідного зображення й зображення, що зберігається у вагах зв'язків нейрона-переможця Y^3_g модуля M_2 . Аналогічно нейронами R_1, R_2 можуть загальмовуватися нейрони шарів Y^1_i, Y^2_i модулів M_{11}, M_{12} , якщо не виконується умова по величині параметрів подібності p^1_1, p^1_2 відповідно для модулів M_{11} і M_{12} .

Двонапрямлена асоціативна пам'ять, побудована на нейронних мережах АРТ-2Д і АРТ-1, орієнтована на роботу, як з безперервними, так і з бінарними вхідними зображеннями. У модулі M_1 ваги зв'язків $b^1_{ij}, b^2_{ij}, t^1_{ji}, t^2_{ji}$ ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$) є безперервними, а в модулі M_2 всі ваги зв'язків нейронів є бінарними за винятком ваг зв'язків із виходів інтерфейсних нейронів на входи розпізнавальних нейронів. Зв'язки від нейронів вхідного шару S^2_i ($i=1, \dots, k$) до керуючих нейронів G_1, G_2 , до вирішального нейрона R^2 і до інтерфейсних нейронів Z^3_i ($i=1, \dots, k$), а також від керуючих нейронів G_1 до шару Z^3_i ($i=1, \dots, k$) і G_2 до шару Y^3_g ($g=1, \dots, m$) і від вирішального нейрона R^2 до шару Y^3_g ($g=1, \dots, m$) модуля M_2 , є гальмуючими. Сигнали, які передаються від інтерфейсних Z^3_i ($i=1, \dots, k$) нейронів до нейрона R^2 й від розпізнавальних нейронів Y^3_g ($g=1, \dots, m$) до нейрона G_1 модуля M_2 , є гальмуючими. Кожний нейрон в інтерфейсному і розпізнавальному шарах модуля M_2 має по три джерела вхідних сигналів, у зв'язку із чим вихідний сигнал нейронів цих шарів визначається по "правилу два із трьох", тобто для переводу нейрона в активний стан потрібно наявність на його входах збудливих сигналів мінімум із двох різних джерел.

Архітектуру мережі, крім модулів M_1 і M_2 на основі нейронних мереж АРТ-2Д і АРТ-1, визначає шар проміжних нейронів P_d ($d=1, \dots, m$), що зв'язує модулі M_1 і M_2 нейронної мережі, і додатковий керуючий нейрон G_3 . На етапі навчання модулі M_1 і M_2 нейронної мережі будуть запам'ятовувати пари асоціативних зображень. При цьому поряд із встановленням значень ваг зв'язків усередині кожного

з модулів, будуть установлюватися й матриці вагових коефіцієнтів проміжного шару нейронів P_d ($d=1, \dots, m$), що зв'язує модулі M_1 і M_2 нейронної мережі. На основі цих вагових коефіцієнтів буде здійснюватися асоціативний зв'язок між запам'ятованими зображеннями двох модулів. Процес навчання нової нейронної мережі вважається закінченим, коли по закінченню чергової епохи навчання відсутні зміни вагових коефіцієнтів: $b_{ij}^1, b_{ij}^2, V_{lg}^1$ і $t_{ji}^1, t_{ji}^2, V_{gl}^2$ ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; l=1, \dots, k; g=1, \dots, m$), відповідно ваг зв'язків від елементів інтерфейсного шару до елементів розпізнавального шару, і ваг зв'язків від елементів розпізнавального шару до елементів інтерфейсного шару модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі. Матриці ваг зв'язків між елементами шарів, що розпізнають, модулів M_1 і M_2 нейронної мережі та елементами проміжного Р-шару на умову зупинки навчання не впливають.

В режимі розпізнавання вхідних зображень і визначення ними асоціативних зображень n - або k -мірні вхідні вектори можуть подаватися відповідно на входи S_1^1 або S_1^2 ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$) елементів, відповідно модулів M_1 або M_2 нейронної мережі. При роботі нейронної мережі в режимі розпізнавання та визначення асоціативних зображень не передбачається подача зображень на обидва поля вхідних елементів одночасно. Нейрон-переможець X_j модуля M_{1j} визначається сигналами нейронів-переможців Y_j^1 і Y_j^2 розпізнавальних шарів Y_j^1, Y_j^2 ($j=1, \dots, m$), відповідно модулів M_{11}, M_{12} . В свою чергу нейрон-переможець Y_j^1 вибирається в результаті змагання нейронів розпізнавального шару Y_j^1 ($j=1, \dots, m$), модуля M_{11} нейронної мережі. Нейрон-переможець Y_j^2 модуля M_{12} вибирається не в результаті змагання нейронів розпізнавального шару Y_j^2 ($j=1, \dots, m$) модуля M_{12} , а сигналом з відповідного нейрона-переможця Y_j^1 модуля M_{11} , після його перевірки за величиною параметра подібності r^1 . У зв'язку із цим введені зв'язки між парами Y -нейронів Y_j^1, Y_j^2 ($j=1, \dots, m$) у модулі M_1 нейронної мережі. Виділений у такий спосіб нейрон Y_j^2 модуля M_{12} , також перевіряється по величині параметра подібності r^2 . Якщо нейрон Y_j^2 витримує цю перевірку й витримує наступну перевірку за величиною параметра подібності й пари нейронів Y_j^1, Y_j^2 модулів M_{11}, M_{12} , то на виході розпізнавального нейрона X_j модуля M_1 з'являється одиничний сигнал, що свідчить про розпізнавання вхідного зображення. Якщо нейрони Y_j^2 або пари елементів Y_j^1, Y_j^2 модулів M_{11}, M_{12} , не витримують перевірку за величиною параметрів подібності, то нейрон Y_j^1 модуля M_{11} , загальмовується ($U_{\text{вих}Y_j^1} = -1$), за допомогою гальмівних зв'язків від нейрону R^1 до шару Y_j^1 ($j=1, \dots, m$), а нейрони Y_j^2 модуля M_{12} , переводяться в неактивний стан ($U_{\text{вих}Y_j^2} = 0$). Нейрон-переможець Y^3_G модуля M_2 визначається в результаті змагання нейронів розпізнавального шару Y^3_g ($g=1, \dots, m$), при цьому його вектор вагових коефіцієнтів, відповідно до заданого значення параметра подібності, повинен відповідати вхідному зображенню.

Після вибору нейрона-переможця X_j або Y^3_G одного з модулів M_1 або M_2 , здійснюється вибір нейрона-переможця іншого модуля нейронної

мережі. Він визначається не в результаті змагання нейронів розпізнавального шару, а активізується нейроном-переможцем іншого модуля, через зв'язки елементів Р-шару. Наприклад, нейрон-переможець модуля за допомогою нейрона G_3 активізує нейрони G_1 і G_2 . Після чого за допомогою сигналів нейрона-переможця X_j нейрона G_2 визначається нейрон-переможець Y^3_G . Цей переможець за допомогою низхідних зв'язків і керуючого нейрона G_1 відновить в інтерфейсному шарі Z -елементів зображення, що зберігається в його пам'яті. Відновлене зображення повториться на шарі S -елементів і надійде на виходи модуля. Таким чином, відбудеться вибір зображення асоціативного вхідному зображенню, що подається на вхід першого модуля нейронної мережі.

Двонапрямлена асоціативна пам'ять, на основі нейронних мереж АРТ-2Д та АРТ-1, функціонує відповідно до двох алгоритмів: навчання й розпізнавання.

В алгоритмах прийняті наступні позначення:

m - максимальне число пар асоціативних зображень;

n - число безперервних компонентів у вхідному векторі модуля M_1 ;

k - число бінарних компонентів у вхідному векторі модуля M_2 ;

L - константа, що перевершує одиницю, рекомендоване значення: $L=2$;

r^1, r^2 - параметри подібності між вхідними векторами й векторами, що зберігаються у вагах зв'язків перемігших нейронів, відповідно Y_j^1 і Y_j^2 модуля M_1 нейронної мережі; діапазон припустимих значень параметрів: $0 < r^1, r^2 \leq 1$;

r^1 і r^2 - загальні параметри подібності, відповідно модулів M_1 і M_2 ;

q - число пар запам'ятованих асоціативних зображень;

b_{ij}^1, b_{ij}^2 ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$) - ваги зв'язків від елементів інтерфейсного шару до елементів розпізнавального шару, відповідно модулів M_{11}, M_{12} ; початкове значення, що рекомендує, при навчанні: $b_{ij}^1 = b_{ij}^2 = 1$ ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$);

t_{ji}^1, t_{ji}^2 ($j=1, \dots, m; i=1, \dots, n$) - ваги зв'язків від елементів розпізнавального шару до елементів інтерфейсного шару, відповідно модулів M_{11}, M_{12} ; початкове рекомендоване значення при навчанні: $t_{ji}^1 = t_{ji}^2 = 1$ ($j=1, \dots, m; i=1, \dots, n$);

V_{lg}^1 ($l=1, \dots, k; g=1, \dots, m$) - ваги зв'язків від елементів інтерфейсного шару до елементів розпізнавального шару модуля M_2 ; діапазон припустимих початкових значень: $0 < V_{lg}^1 \leq \frac{1}{L-1+k}$; початкове

рекомендоване значення при навчанні: $V_{lg}^1 = \frac{1}{1+k}$;

V_{gl}^2 ($g=1, \dots, m; l=1, \dots, k$) - ваги зв'язків від елементів розпізнавального шару до елементів інтерфейсного шару модуля M_2 ; початкове рекомендоване значення при навчанні: $V_{gl}^2 = 1$ ($g=1, \dots, m; l=1, \dots, k$);

$U_{\text{вих}S_i^1}, U_{\text{вих}S_i^2}$ ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$) - вихідні сигнали сенсорних елементів S -шару, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вх}}.Z_i^1, U_{\text{вх}}.Z_i^2 \text{ і } U_{\text{вих}}.Z_i^1, U_{\text{вих}}.Z_i^2 \text{ (} i=1, \dots, n \text{)}$ - вхідні і вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару, відповідно модулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі;

$U_{\text{вх}}.Z_d^3 \text{ і } U_{\text{вих}}.Z_d^3 \text{ (} l=1, \dots, k \text{)}$ - вхідні й вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару модуля M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вих}}.Y_j^1, U_{\text{вих}}.Y_j^2 \text{ і } U_{\text{вих}}.Y_g^3 \text{ (} j=1, \dots, m; g=1, \dots, m \text{)}$ - вихідні сигнали розпізнавальних елементів модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вих}}.X_j \text{ (} j=1, \dots, m \text{)}$ - вихідні сигнали розпізнавальних елементів модуля M_1 нейронної мережі;

$U_{\text{вих}}.S_{i_{\text{max}}}^1$ - максимальний вихідний сигнал сенсорного нейрону із поданого на вхід модуля M_1 зображення;

$(S^{11}, S^{21}), (S^{12}, S^{22}), \dots, (S^{1q}, S^{2q})$ - пари асоціативних зображень, які запам'ятовуються модулями M_1 і M_2 нейронної мережі;

$S^{1r} = (S^{1r_1}, \dots, S^{1r_n}), S^{2r} = (S^{2r_1}, \dots, S^{2r_k}), r=1, \dots, q$ - безперервні або бінарні вхідні вектора r -ї пари асоціативних зображень, відповідно для модулів M_1 і M_2 нейронної мережі, де $S^{1r} = I^r(t_i)$ ($t_i=0, 1, 2, \dots, n-1$) - функція часу, у якій кожному моменту часу відповідає один вхідний нейрон;

$\|Y\|$ - норма вектора Y ;
 $I_{f_{\text{min}}}^r(t_i), I_{f_{\text{max}}}^r(t_i) \text{ (} r=1, \dots, q; f=1, \dots, n; t_i=0, 1, 2, \dots, n-1 \text{)}$ - відповідно мінімальне і максимальне значення змінної $I_f^r(t_i)$ у множині $I_{f_1}^r(t_i), I_{f_2}^r(t_i), \dots, I_{f_n}^r(t_i)$ навчальних зображень у моменти часу t_i ;

$I_{f_{\text{max}}}^r = \max(I_{f_1}^r(t_i), I_{f_2}^r(t_i), \dots, I_{f_n}^r(t_i)), r=1, \dots, q, f=1, \dots, n, t_i=0, 1, 2, \dots, n-1$;

$I_{f_{\text{min}}}^r = \min(I_{f_1}^r(t_i), I_{f_2}^r(t_i), \dots, I_{f_n}^r(t_i)), r=1, \dots, q, f=1, \dots, n, t_i=0, 1, 2, \dots, n-1$.

Множини огинаючих задаються попередньо на етапі підготовки мережі донавчання і задають границі діапазонів значень окремих класів зображень, яким буде асоційовано відповідні дискретні зображення. Існує декілька способів визначення огинаючих: вибір максимальних і мінімальних значень набору кривих у певні моменти часу, як це показано у попередній формулі, або шляхом задання діапазону зсуву за віссю ординат відносно однієї кривої:

$I_{f_{\text{max}}}^r = I_{f_1}^r(t_i) + \Delta(t_i), r=1, \dots, q, f=1, \dots, n, t_i=0, 1, 2, \dots, n-1$;
 $I_{f_{\text{min}}}^r = I_{f_1}^r(t_i) + \Delta(t_i), r=1, \dots, q, f=1, \dots, n, t_i=0, 1, 2, \dots, n-1$.

$P_d \text{ (} d=1, \dots, m \text{)}$ - нейрони проміжного шару, які зв'язують модулі M_1 і M_2 нейронної мережі;

$H_{jd}^1, Q_{gd}^1 \text{ (} j=1, \dots, m; d=1, \dots, m; g=1, \dots, m \text{)}$ - ваги зв'язків від елементів розпізнавального шару до елементів проміжного P -шару, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі;

$H_{dj}^1, Q_{dg}^1 \text{ (} d=1, \dots, m; j=1, \dots, m; g=1, \dots, m \text{)}$ - ваги зв'язків від елементів проміжного P -шару до елементів розпізнавального шару відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

Алгоритм навчання двонапрямленої асоціативної пам'яті, побудованої на основі нейронних мереж АРТ-2Д і АРТ-1, припускає виконання наступних кроків:

Крок 1

Ініціюються параметри подібності p^1, p^2 , ваги зв'язків модулів M_{11}, M_{12} і M_2 : $b_{ij}^1, b_{ij}^2, t_{ij}^1, t_{ij}^2$ і $V_{gi}^1, V_{gi}^2 \text{ (} i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; l=1, \dots, k; g=1, \dots, m \text{)}$ і ваги зв'язків, що об'єднують проміжний шар елементів P_d

$(d=1, \dots, m)$, і модулі M_1 й M_2 асоціативної нейронної мережі: $H_{jd}^1, Q_{gd}^1, H_{dj}^2, Q_{dg}^2 \text{ (} j=1, \dots, m; d=1, \dots, m; g=1, \dots, m \text{)}$.

Крок 2

Задаються нульові вихідні сигнали всіх розпізнавальних елементів модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі:

$U_{\text{вих}}.Y_j^1 = 0; U_{\text{вих}}.Y_j^2 = 0; U_{\text{вих}}.X_j = 0; j=1, \dots, m$;

$U_{\text{вих}}.Y_g^3 = 0; g=1, \dots, m$.

Крок 3

Для кожної пари вхідних зображень $S^1_r = (S^1_{r1}, \dots, S^1_{rm}), S^2_r = (S^2_{r1}, \dots, S^2_{rk}), r=1, \dots, q$ виконуються кроки 4-22.

Крок 4

Вхідними векторами S^1_r та $S^2_r \text{ (} r=1, \dots, q \text{)}$ визначаються вихідні сигнали елементів S^1_i та $S^2_l \text{ (} i=1, \dots, n; l=1, \dots, k \text{)}$ вхідних шарів, відповідно модулів M_1 і M_2 :

$U_{\text{вих}}.S_i^1 = S_{i1}^1; U_{\text{вих}}.S_l^2 = S_{l1}^2; i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$.

Для кожної пари вхідних векторів у модулі M_1 визначається множина верхніх і нижніх огинаючих $I_{f_{\text{max}}}^r(t_i), I_{f_{\text{min}}}^r(t_i)$.

Верхні $I_{f_{\text{max}}}^r(t_i)$ і нижні $I_{f_{\text{min}}}^r(t_i)$ огинаючі вхідних векторів послідовно під керуванням нейрона F , що спочатку дозволяє роботу першого нормуючого нейрону а потім другого, через сенсорний шар і відповідні нормуючі нейрони N_1, N_2 подаються на входи елементів Z_i^1 і $Z_l^2 \text{ (} i=1, \dots, n \text{)}$ інтерфейсних шарів, відповідно модулів M_{11} і M_{12} нейронної мережі.

Крок 5

Для кожної огинаючої $I_{f_{\text{min}}}^r(t_i), I_{f_{\text{max}}}^r(t_i)$ (модуль M_1) і для $U_{\text{вих}}.S_l^2 \text{ (} l=1, \dots, k \text{)}$ (модуль M_2), виконуються кроки алгоритму 6-17.

Крок 6

Формуються вхідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_i^1, Z_l^2 та $Z_i^3 \text{ (} i=1, \dots, n; l=1, \dots, k \text{)}$ модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі, шляхом обчислення норм векторів вихідних сигналів нейронів вхідного шару модулів M_1 і M_2 :

$U_{\text{вх}}.Z_i^1 = \frac{U_{\text{вих}}.S_i^1}{U_{\text{вих}}.S_{i_{\text{max}}}^1}; U_{\text{вх}}.Z_l^2 = \frac{U_{\text{вих}}.S_l^2}{U_{\text{вих}}.S_{l_{\text{max}}}^2}; i=1, \dots, n$;

$\|U_{\text{вих}}.S_i^2\| = \sum_{l=1}^k U_{\text{вих}}.S_l^2; U_{\text{вх}}.Z_i^3 = U_{\text{вих}}.S_i^2; i=1, \dots, n$.

Крок 7

Поки не знайдені нейрони-переможці розпізнавальних шарів Y_j^1, Y_j^2 і $Y_g^3 \text{ (} j=1, \dots, m; g=1, \dots, m \text{)}$ відповідно модулів M_{11}, M_{12} і M_2 , вагові вектора яких відповідно до заданих значень параметрів подібності p^1, p^2 відповідають вхідним векторам S^1_r і S^2_r , виконуються кроки 8-17 (для обох модулів M_1 і M_2 , або для одного із цих модулів).

Крок 8

Формуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_i^1, Z_l^2 та $Z_i^3 \text{ (} i=1, \dots, n; l=1, \dots, k \text{)}$ модулів M_{11}, M_{12} і M_2 асоціативної нейронної мережі:

$U_{\text{вих}}.Z_i^1 = U_{\text{вх}}.Z_i^1; U_{\text{вих}}.Z_l^2 = U_{\text{вх}}.Z_l^2; i=1, \dots, n$;

$U_{\text{вих}}.Z_i^3 = U_{\text{вх}}.Z_i^3; i=1, \dots, n$.

Крок 9

Для кожного незагальмованого розпізнаваль-ного Y-нейрона модулів M_{11} , M_{12} і M_2 нейронної мережі, розраховуються його вихідні сигнали:

$$U_{\text{вих.}Y_j^1} = \sum_{i=1}^n b_{ij}^1 U_{\text{вих.}Z_i^1}, \quad \text{якщо} \quad U_{\text{вих.}Y_j^1} \neq -1, \quad j=1, \dots, m;$$

$$U_{\text{вих.}Y_j^2} = \sum_{i=1}^n b_{ij}^2 U_{\text{вих.}Z_i^2}, \quad \text{якщо} \quad U_{\text{вих.}Y_j^2} \neq -1, \quad j=1, \dots, m;$$

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} = \sum_{l=1}^k V_{gl}^1 U_{\text{вих.}Z_l^3}, \quad \text{якщо} \quad U_{\text{вих.}Y_g^3} \neq -1, \quad g=1, \dots, m;$$

Крок 10

В Y-шарах модулів M_1 , M_{12} і M_2 визначаються нейрони Y_j^1 , Y_j^2 та Y_g^3 відповідно, що задовольняють умові:

$$U_{\text{вих.}Y_j^1} \geq U_{\text{вих.}Y_j^1}, \quad U_{\text{вих.}Y_j^2} \geq U_{\text{вих.}Y_j^2}, \quad j=1, \dots, m;$$

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} \geq U_{\text{вих.}Y_g^3}, \quad g=1, \dots, m.$$

Якщо елементів Y_j^1 , Y_j^2 та Y_g^3 у відповідних їм шарах Y_j^1 , Y_j^2 і Y_g^3 модулів M_{11} , M_{12} і M_2 декілька, то вибираються елементи з найменшими індексами. Якщо знайдений нейрон-переможець є загальмованим, то вхідне зображення для даного модуля не може бути запам'ятовано. Наприклад, для модуля M_1 нейронної мережі, якщо $U_{\text{вих.}Y_j^1} \neq -1$

або (i) $U_{\text{вих.}Y_j^2} \neq -1$, то всі елементи шарів Y_j^1 або Y_j^2 (Y_j^1 і Y_j^2) ($j=1, \dots, m$) модуля M_1 загальмовані і верхня або нижня (обидві) огинаючі вхідного зображення не можуть бути запам'ятовані.

Крок 11

Знайденим нейронам-переможцям Y_j^1 , Y_j^2 та Y_g^3 у відповідних їм шарах Y_j^1 , Y_j^2 та Y_g^3 ($j=1, \dots, m$;

$$P_1^*(f, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } I_{f \max}^*(t_i) \geq I_f^*(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, n-1; \\ 0, & \text{если } I_{f \max}^*(t_i) < I_f^*(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, n-1. \end{cases}$$

$$P_2^*(f, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } I_{f \min}^*(t_i) \leq I_f^*(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, n-1; \\ 0, & \text{если } I_{f \min}^*(t_i) > I_f^*(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, n-1. \end{cases}$$

де $\|P_1^*(f, t_i)\|$ і $\|P_2^*(f, t_i)\|$ - норми функцій $P_1^*(f, t_i)$ і $P_2^*(f, t_i)$, що визначаються співвідношеннями:

$$\|P_1^*(f, t_i)\| = \sum_{t_i=0}^{n-1} P_1^*(f, t_i), \quad \|P_2^*(f, t_i)\| = \sum_{t_i=0}^{n-1} P_2^*(f, t_i).$$

Для модуля M_2 нейронної мережі обчислюється норма вектора вихідних сигналів нейронів інтерфейсного шару:

$$\|U_{\text{вих.}Z^3}\| = \sum_{l=1}^k U_{\text{вих.}Z_l^3}$$

Крок 14

За обчисленими параметрами подібності p_1^1 , p_1^2 перевіряється правильність вибору нейронів-переможців Y_j^1 , Y_j^2 у відповідних їм шарах Y_j^1 , Y_j^2 ($j=1, \dots, m$) модулів M_{11} , M_{12} нейронної мережі. Правильність вибору перевіряється в такий спосіб: якщо $p_1^1 < p_1^1$, то умова не виконується, елемент Y_j^1 загальмовується: $U_{\text{вих.}Y_j^1} = -1$; здійснюється перехід до кроку 8 алгоритму. Якщо $p_1^1 \geq p_1^1$, то умова, що підтверджує правильність вибору переможця Y_j^1 модуля M_{11} виконується і здійснюється перехід

$g=1, \dots, m$) модулів M_{11} , M_{12} і M_2 привласнюється одиничне значення вихідного сигналу $U_{\text{вих.}Y_j^1} = 1$,

$U_{\text{вих.}Y_j^2} = 1$ і $U_{\text{вих.}Y_g^3} = 1$, а всі інші розпізнавальні нейрони розпізнавальних шарів модулів M_2 , переводяться в неактивний стан:

$$U_{\text{вих.}Y_j^1} = 0, \quad U_{\text{вих.}Y_j^2} = 0, \quad j=1, \dots, m, \quad j \neq J,$$

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} = 0, \quad g=1, \dots, m, \quad g \neq G.$$

Крок 12

Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_i^1 , Z_i^2 ($i=1, \dots, n$) і Z_l^3 ($l=1, \dots, k$), відповідно модулів M_{11} , M_{12} і M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z_i^1} = U_{\text{вих.}Y_j^1} t_{ji}^1, \quad U_{\text{вих.}Z_i^2} = U_{\text{вих.}Y_j^2} t_{ji}^2, \quad i=1, \dots, n;$$

$$U_{\text{вих.}Z_l^3} = U_{\text{вих.}Y_g^3} V_{gl}^2, \quad l=1, \dots, k.$$

Крок 13

Визначаються параметри подібності p_1^1 , p_1^2 , відповідно для модулів M_{11} , M_{12} нейронної мережі. Параметри подібності p_1^1 , p_1^2 відповідно для верхніх $I_{f \max}^*(t_i)$ і нижніх $I_{f \min}^*(t_i)$ огинаючих і зображень зв'язків, що зберігаються у вагах нейронів-переможців, відповідно Y_j^1 і Y_j^2 модуля M_1 нейронної мережі, визначаються в такий спосіб:

$$p_1^1 = \frac{\|P_1^*(f, t_i)\|}{n}, \quad p_1^2 = \frac{\|P_2^*(f, t_i)\|}{n},$$

де $P_1^*(f, t_i)$ і $P_2^*(f, t_i)$ - функції, що відповідають г-му динамічному режиму, що розпізнається по відповідно максимальним $I_{f \max}^*(t_i)$ і мінімальним $I_{f \min}^*(t_i)$ значенням:

до наступного кроку алгоритму. Аналогічним образом проводиться перевірка правильності вибору нейрона-переможця Y_j^2 в шарі Y_j^2 ($j=1, \dots, m$) модуля M_{12} нейронної мережі.

Одночасно із цим у модулі M_2 перевіряється за параметром подібності p^2 правильність вибору

нейрона-переможця Y_g^3 . Якщо $p = \left\| \frac{U_{\text{вих.}Z^3}}{U_{\text{вих.}S_l^2}} \right\| < p^2$,

то умова не виконується, елемент Y_g^3 загальмовується: $U_{\text{вих.}Y_g^3} = -1$; здійснюється перехід до кроку

8 алгоритму. Якщо $p \geq p^2$, то умова, що підтверджує правильність вибору переможця Y_g^3 модуля M_2 виконується.

Крок 15

Виконується перевірка правильності вибору нейронів-переможців по загальному параметрі подібності p^1 для модулів M_1 нейронної мережі. Якщо $p_1^1 \leq p_1^1 + p_1^2 - 1$, то підтверджується правильність вибору нейронів-переможців Y_j^1 , Y_j^2 , відпові-

дно для модулів M_{11} , M_{12} нейронної мережі й здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму. Якщо умова не виконується, то загальмовується елемент Y^1_j : $U_{\text{вих.}Y^1_j} = -1$; і здійснюється перехід до кроку 8 алгоритму.

Крок 16

Адаптуються ваги зв'язків елементів Y^1_j , Y^2_j та $Y^3_{G_1}$ відповідно для модулів M_{11} , M_{12} і M_2 нейронної мережі:

$$b^1_{ij} = U_{\text{вх.}Z^1_i}, \quad t^1_{ji} = U_{\text{вх.}Z^1_i}, \quad b^2_{ij} = U_{\text{вх.}Z^2_i}, \\ t^2_{ji} = U_{\text{вх.}Z^2_i}, \quad i=1, \dots, n;$$

$$V^1_{lg} = \frac{LU_{\text{вих.}Z^3_l}}{L-1+U_{\text{вих.}Z^3_l}}, \quad V^2_{lg} = U_{\text{вих.}Z^3_l}, \quad l=1, \dots, k.$$

Крок 17

Пари нейронів-переможців Y^1_j і Y^2_j активізує відповідний їм нейрон розпізнавального шару X_j модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 18

Перевіряється умова закінчення навчання модулів M_1 і M_2 нейронної мережі, якщо вона не виконується, то триває навчання одного або обох модулів мережі, у противному випадку здійснюється перехід на наступний крок алгоритму з метою визначення ваг зв'язків нейронів Р-шару.

Крок 19

Для кожної пари вхідних зображень (S^1_r, S^2_r) , $r=1, \dots, q$ виконуються кроки 20-22.

Крок 20

Вхідними зображеннями S^1_r і S^2_r ($r=1, \dots, q$), що подаються відповідно на входи модулів M_1 і M_2 нейронної мережі, визначаються нейрони-переможці X^1_{Jr} , Y^3_{Gr} модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

Крок 21

Визначаються ваги зв'язків між нейроном-переможцем X^1_{Jr} модуля M_1 і елементами Р-слоя:

$$H^1_{Jr,Gr} = Q^2_{Gr,Gr} = 1; \\ H^1_{Jr,d} = H^2_{Jr,d} = 0, \quad d=1, \dots, m; \quad d \neq Jr; \quad j=1, \dots, m; \quad j \neq Jr.$$

Крок 22

Визначаються ваги зв'язків між нейроном-переможцем Y^3_{Gr} модуля M_2 і елементами Р-слоя:

$$H^2_{Jr,Gr} = Q^1_{Gr,Gr} = 1; \\ Q^1_{Gr,d} = Q^2_{Gr,d} = 0, \quad d=1, \dots, m; \quad d \neq Gr; \quad g=1, \dots, m; \quad g \neq Gr.$$

Крок 23

Останов.

Алгоритм роботи, у режимі визначення асоціативних дискретних зображень за безперервними, двонапрямленою асоціативною пам'яті на основі нейронних мереж АРТ-2Д и АРТ-1, припускає виконання наступних кроків:

Крок 1

Ініціюються параметри подібності p^1 , p^2 , ваги зв'язків модулів M_{11} , M_{12} і M_2 : b^1_{ij} , b^2_{ij} , t^1_{ji} , t^2_{ji} ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$) та V^1_{lg} , V^2_{lg} ($l=1, \dots, k$; $g=1, \dots, m$), і ваги зв'язків, що об'єднують проміжний шар елементів P_d ($d=1, \dots, m$), і модулі M_1 та M_2 асоціативний нейронної мережі: H^1_{jd} , Q^1_{gd} , H^2_{dj} , Q^2_{dg} ($j=1, \dots, m$; $d=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$).

Крок 2

Задаються нульові вихідні сигнали всіх розпізнавальних елементів модулів M_{11} , M_{12} і M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Y^1_j} = 0; \quad U_{\text{вих.}Y^2_j} = 0; \quad U_{\text{вих.}Y_j} = 0; \quad j=1, \dots, m;$$

$$U_{\text{вих.}Y^3_g} = 0; \quad g=1, \dots, m.$$

Крок 3

Вхідне зображення $S^r = (S^r_1, \dots, S^r_n)$ ($r=1, \dots, q$) подається на вхід модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 4

Вхідний вектор S^r ($r=1, \dots, q$) визначає вихідні сигнали елементів S^1_j ($j=1, \dots, n$) вхідного шару модуля M_1 :

$$U_{\text{вих.}S^1_i} = S^1_i; \quad i=1, \dots, n.$$

Крок 5

Під керуванням керуючого вектора F за допомогою нормуючого нейрона N_1 формуються вхідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^1_i ($i=1, \dots, n$) модуля M_{11} нейронної мережі, шляхом обчислення норми вектора вихідних сигналів нейронів вхідного шару модуля M_1 :

$$U_{\text{вх.}Z^1_i} = \frac{U_{\text{вих.}S^1_i}}{U_{\text{вих.}S^1_{\text{max}}}}; \quad i=1, \dots, n.$$

Крок 6

Поки не знайдений нейрон-переможець розпізнавального шару Y^1_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{11} , ваговий вектор якого відповідно до заданого значення параметра подібності p^1 відповідає вхідному вектору S^r ($r=1, \dots, q$), виконуються кроки 7-19.

Крок 7

Формуються вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^1_i ($i=1, \dots, n$) модуля M_{11} асоціативної нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z^1_i} = U_{\text{вх.}Z^1_i}; \quad i=1, \dots, n.$$

Крок 8

Для кожного незагальмованого розпізнавального Y -нейрона модуля M_{11} нейронної мережі, розраховуються його вихідні сигнали:

$$U_{\text{вих.}Y^1_j} = \sum_{i=1}^n b^1_{ij} U_{\text{вих.}Z^1_i}, \quad \text{якщо} \quad U_{\text{вих.}Y^1_j} \neq -1, \\ j=1, \dots, m.$$

Крок 9

В 7-шарі модуля M_{11} визначається нейрон Y^1_j , що задовольняє умові:

$$U_{\text{вих.}Y^1_j} \geq U_{\text{вих.}Y^1_j}, \quad j=1, \dots, m;$$

Якщо таких елементів у шарі Y^1_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{11} декілька, то вибирається елемент із найменшим індексом. Якщо знайдений нейрон-переможець є загальмованим, то вхідне зображення для даного модуля не може бути розпізнано.

Крок 10

Знайденому нейрону-переможцеві Y^1_j в шарі Y^1_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{11} привласнюється одиничне значення вихідного сигналу $U_{\text{вих.}Y^1_j} = 1$, а всі інші нейрони розпізнавального шару Y^1_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{11} , переводяться в неактивний стан: $U_{\text{вих.}Y^1_j} = 0$, $j=1, \dots, m$, $j \neq J$.

Крок 11

Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^1_j ($i=1, \dots, n$) модуля M_{11} нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z^1_j} = U_{\text{вих.}Y^1_j} t^1_{ji}, \quad i=1, \dots, n.$$

Крок 12

Визначається параметр подібності p^1_1 для модуля M_{11} нейронної мережі. Параметр подібності p^1_1 визначається в такий спосіб:

$$P^*_1(f, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } I^*_{f \max}(t_i) \geq I^*_f(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, n-1; \\ 0, & \text{если } I^*_{f \max}(t_i) < I^*_f(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, n-1. \end{cases}$$

де $\|P^*_1(f, t_i)\|$ - норма функції $P^*_1(f, t_i)$, що визначається співвідношенням:

$$\|P^*_1(f, t_i)\| = \sum_{t_i=0}^{n-1} P^*_1(f, t_i).$$

Крок 13

Перевіряється, по обчисленому параметрі подібності p^1_1 , правильність вибору нейрона-переможця Y^1_j в шарі Y^1_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{11} нейронної мережі. Правильність вибору перевіряється в такий спосіб: якщо $p^1_1 < p^1$, то умова не виконується, елемент Y^1_j загальмовується: $U_{\text{вих.}Y^1_j} = -1$; здійснюється перехід до кроку 7 алгоритму. Якщо $p^1_1 \geq p^1$, то умова, що підтверджує правильність вибору переможця Y^1_j модуля M_{11} , виконується і здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму.

Крок 14

Нейрон Y^1_j у шарі Y^1_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{11} своїм вихідним сигналом на вхід нейрона Y^2_j в шарі Y^2_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{12} , перетворює його в нейрон-переможця модуля M_{12} .

Крок 15

Нейрону-переможцеві Y^2_j в шарі Y^2_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{12} привласнюється одиничне значення вихідного сигналу $U_{\text{вих.}Y^2_j} = 1$, а всі інші нейрони розпізнавального шару Y^2_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{12} , переводяться в неактивний стан: $U_{\text{вих.}Y^2_j} = 0$, $j=1, \dots, m, j \neq j$.

Крок 16

Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^2_i ($i=1, \dots, n$) модуля M_{12} нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z^2_i} = U_{\text{вих.}Y^2_j} t^2_{ji}, \quad i=1, \dots, n.$$

Крок 17

Визначається параметр подібності p^1_2 для модуля M_{12} нейронної мережі. Параметр подібності p^1_2 визначаються в такий спосіб:

$$p^1_2 = \frac{\|P^*_2(f, t_i)\|}{n},$$

де $P^*_2(f, t_i)$ - функція, що відповідає g -му динамічному режиму, що розпізнається за мінімальним $I^*_{f \min}(t_i)$ значенням:

$$P^*_2(f, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } I^*_{f \min}(t_i) \leq I^*_f(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, \\ 0, & \text{если } I^*_{f \min}(t_i) > I^*_f(t_i), \quad f = 1, \dots, n, \quad t_i = 0, 1, \dots, \end{cases}$$

де $\|P^*_2(f, t_i)\|$ норма функції $P^*_2(f, t_i)$, що визначається співвідношенням:

$$p^1_1 = \frac{\|P^*_1(f, t_i)\|}{n},$$

де $P^*_1(f, t_i)$ - функція, що відповідає g -му динамічному режиму, що розпізнається за максимальним $I^*_{f \max}(t_i)$ значенням:

$$\|P^*_2(f, t_i)\| = \sum_{t_i=0}^{n-1} P^*_2(f, t_i).$$

Крок 18

Перевіряється, по обчисленому параметру подібності p^1_2 , правильність вибору нейрона-переможця Y^2_j в шарі Y^2_j ($j=1, \dots, m$) модуля M_{12} нейронної мережі. Правильність вибору перевіряється в такий спосіб: якщо $p^1_2 < p^1$, то умова не виконується, елемент Y^2_j загальмовується: $U_{\text{вих.}Y^2_j} = -1$; здійснюється перехід до кроку 7 алгоритму. Якщо $p^1_2 \geq p^1$, то умова, що підтверджує правильність вибору переможця Y^2_j модуля M_{12} , виконується і здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму.

Крок 19

Виконується перевірка правильності вибору нейронів-переможців Y^1_j і Y^2_j для модуля M_1 за загальним параметром подібності p^1 . Якщо $p^1 \leq p^1_1 + p^1_2 - 1$, то підтверджується правильність вибору нейронів-переможців Y^1_j і Y^2_j для модуля M_1 нейронної мережі і здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму. Якщо умова не виконується, то здійснюється перехід до кроку 7 алгоритму.

Крок 20

Пара нейронів-переможців Y^1_j і Y^2_j активізує відповідний їм нейрон-переможця розпізнавального шару X_j модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 21

Визначається переможця Y^3_g модуля M_2 нейронної мережі. Він виділяється одиничним сигналом від елемента P_j , що, у свою чергу, в активний стан переводиться нейроном-переможцем X_j модуля M_1 .

Крок 22

Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^3_l ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z^3_l} = V^2_{lg}, \quad l=1, \dots, k.$$

Крок 23

На основі вихідних сигналів елементів інтерфейсного шару Z^3_l ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі, формуються вхідні і вихідні сигнали елементів вхідного шару S^2_l ($l=1, \dots, k$), модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вх.}S^2_l} = U_{\text{вих.}Z^3_l}, \quad l=1, \dots, k,$$

$$U_{\text{вих.}S^2_l} = U_{\text{вх.}S^2_l}, \quad l=1, \dots, k.$$

Отримане на виході модуля M_2 зображення $S^2_r = (S^2_{r1}, \dots, S^2_{rk})$, є асоціацією зображенню $S^1_r = (S^1_{r1}, \dots, S^1_{rm})$ ($r=1, \dots, q$), що подається на елеме-

нти вхідного шару першого модуля нейронної мережі.

Крок 24

Останов.

Алгоритм роботи, у режимі визначення асоціативних безперервних зображень за дискретними, двонапрямленою асоціативною пам'яті на основі нейронних мереж АРТ-2Д и АРТ-1, припускає виконання наступних кроків:

Крок 1

Ініціюються параметри подібності p^1, p^2 , ваги зв'язків модулів M_{11}, M_{12} і M_2 : $b^1_{ij}, b^2_{ij}, t^1_{ji}, t^2_{ji}$ ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$) та V^1_{lg}, V^2_{gl} ($l=1, \dots, k$; $g=1, \dots, m$), і ваги зв'язків, що об'єднують проміжний шар елементів P_d ($d=1, \dots, m$), і модулів M_1 та M_2 асоціативний нейронної мережі: $H^1_{jd}, Q^1_{gd}, H^2_{dj}, Q^2_{dg}$ ($j=1, \dots, m$; $d=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$).

Крок 2

Задаються нульові вихідні сигнали всіх розпізнавальних елементів модулів M_{11}, M_{12} і M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Y_j^1} = 0; U_{\text{вих.}Y_j^2} = 0; U_{\text{вих.}Y_j} = 0; j=1, \dots, m;$$

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} = 0; g=1, \dots, m.$$

Крок 3

Вхідне зображення $S^{2r} = (S^{2r}_1, \dots, S^{2r}_k)$ ($r=1, \dots, q$) подається на вхід модуля M_2 нейронної мережі.

Крок 4

Вхідним вектором S^{2r} ($r=1, \dots, q$) визначаються вихідні сигнали елементів S^2_{l1} ($l=1, \dots, k$) вхідного шару модуля M_2 :

$$U_{\text{вих.}S_{l1}^2} = S^2_{l1}, l=1, \dots, k.$$

Крок 5

Формуються вхідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^3_{l1} ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі, шляхом обчислення норм векторів вихідних сигналів нейронів вхідного шару модуля M_2 :

$$\|U_{\text{вих.}S_{l1}^2}\| = \sum_{i=1}^k U_{\text{вих.}S_{l1}^2}; U_{\text{вих.}Z_{l1}^3} = U_{\text{вих.}S_{l1}^2}; l=1, \dots, k.$$

Крок 6

Формуються вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^3_{l1} ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 асоціативної нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z_{l1}^3} = U_{\text{вих.}S_{l1}^2}; l=1, \dots, k.$$

Крок 7

Для кожного незагальмованого розпізнавального Y -нейрона модуля M_2 нейронної мережі, розраховуються його вихідні сигнали:

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} = \sum_{l=1}^k V^1_{lg} U_{\text{вих.}Z_{l1}^3}, \quad \text{якщо} \quad U_{\text{вих.}Y_g^3} \neq -1, \\ g=1, \dots, m.$$

Крок 8

В Y -шарі модуля M_2 визначається нейрон Y^3_G , що задовольняє умові:

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} \geq U_{\text{вих.}Y_g^3}, g=1, \dots, m.$$

Якщо елементів Y^3_G у шарі Y^3_G ($g=1, \dots, m$) модуля M_2 декілька, то вибираються елементи з найменшими індексами. Якщо знайдений нейрон-переможець є загальмованим, то вхідне зображення для даного модуля не може бути розпізнано.

Крок 9

Знайденому нейрону-переможцю Y^3_G у шарі Y^3_G ($g=1, \dots, m$) модуля M_2 привласнюється одиничне значення вихідного сигналу $U_{\text{вих.}Y_g^3} = 1$, а всі

інші розпізнавальні нейрони розпізнавального шарів модулів M_{11}, M_{12} і M_2 , переводяться в неактивний стан:

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} = 0, g=1, \dots, m, g \neq G.$$

Крок 10

Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z^3_{l1} ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z_{l1}^3} = U_{\text{вих.}Y_g^3} V^2_{gl}, l=1, \dots, k.$$

Крок 11

Для модуля M_2 нейронної мережі обчислюється норма вектора вихідних сигналів нейронів інтерфейсного шару:

$$\|U_{\text{вих.}Z^3}\| = \sum_{l=1}^k U_{\text{вих.}Z_{l1}^3}.$$

Крок 12

У модулі M_2 перевіряється за параметром подібності p^2 правильність вибору нейрона-

переможця Y^3_G . Якщо $p = \frac{U_{\text{вих.}Z^3}}{U_{\text{вих.}S^2_{l1}}} < p^2$, то умова

не виконується, елемент Y^3_G загальмовується:

$U_{\text{вих.}Y_g^3} = -1$; здійснюється перехід до кроку 6 алгоритму. Якщо $p \geq p^2$, то умова, що підтверджує правильність вибору переможця Y^3_G модуля M_2 виконується.

Крок 13

Визначається нейрон-переможець X_j модуля M_1 нейронної мережі. Він виділяється одиничним сигналом від елемента P_j , що, у свою чергу, в активний стан переводиться нейроном-переможцем Y^3_G модуля M_2 .

При цьому вихідному сигналу нейрона-переможця X_j присвоюється одиничне значення $U_{\text{вих.}X_j} = 1$.

Крок 14

Загальний розпізнавальний шар активізує відповідні нейрони Y^1_j, Y^2_j розпізнавальних шарів Y^1, Y^2 ($j=1, \dots, m$) модулів M_{11} і M_{12} .

Крок 15

Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z^1_{l1}, Z^2_{l1} ($l=1, \dots, n$) модулів M_{11} і M_{12} нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z_{l1}^1} = U_{\text{вих.}Y_j^1} t^1_{ji}, U_{\text{вих.}Z_{l1}^2} = U_{\text{вих.}Y_j^2} t^2_{ji}, i=1, \dots, n.$$

Крок 16

Розраховуються вихідні сигнали нейронів сенсорного шару модуля M_1 на основі сигналів нейронів інтерфейсних шарів Z^1_{l1}, Z^2_{l1} ($l=1, \dots, n$) модулів M_{11} і M_{12} :

$$U_{\text{вих.}S_{l1}^1} = \frac{U_{\text{вих.}Z_{l1}^1} + U_{\text{вих.}Z_{l1}^2}}{2};$$

Крок 17

Останов.

Таким чином, розроблений пристрій двонапрямленою асоціативною пам'яті має всі переваги прототипу, як можливість донавчання в процесі свого функціонування, здатен відокремлювати

нові образи від перекручених або зашумлених відомих образів, і високі показники по розпізнаванню образів, а також дозволяє запам'ятовувати і асоціювати не тільки дискретні, але й безперервні образи.

Джерела інформації:

1. Патент на винахід №WO9854653, кл. G06N3/063, 1998.

2. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 344с.

3. Патент на корисну модель №18624, кл. G06G7/00, бюл. № 11, 2006.

