

***Myskiv Ye.M., Mayevskyy V.O., Maksymiv V.M., Matsyshyn Ya.V.* The mathematical model of sawing by sector method for log with elliptic form of cross section into quarter-sawed lumber**

The mathematical model of sector sawing for logs with elliptic form of cross section into radial lumber was developed. Truncated paraboloid of revolution as a geometric figure was used for log description and development of mathematical model. This mathematical model can also used for sawing of logs with circular cross section.

Reliability of the developed mathematical model was confirmed by experimental results that will allow its application for prediction of lumber recovery under working conditions.

Keywords: mathematical model, log form, truncated paraboloid of revolution, sawing, sector method, prediction, quarter-sawed lumber.

УДК 004.032.26

Аспір. Ю.І. Патерега¹ – НУ "Львівська політехніка"

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ ОСЦИЛЯТОРІВ У РОБОТОТЕХНІЦІ

Стисло розглянуто використання штучних нейронних осциляторів у різних типах роботів. Зокрема, розглянуто роботи, які моделюють рух риб, роботи, що здійснюють коливальні рухи, а також роботи, спроможні імітувати ходьбу на двох кінцівках. Сформульовано актуальні питання у цій галузі досліджень.

Ключові слова: штучний нейронний осцилятор, центральний модельний генератор, "рибний" робот, робот, що здійснює коливальні рухи, двоногий ходячий робот.

Вступ. Відомо, що коливальні процеси відбуваються у нервовій системі живих організмів на всіх її рівнях – від окремої клітини до великих мереж. Початкові дослідження в галузі фізіології були спрямовані на вивчення основних механізмів ритмічних процесів, які відбуваються у нейронах. Зокрема, Годжкін і Хакслі отримали Нобелівську премію за відкриття біофізичного механізму, що лежить в основі генерації і передачі нервового сигналу в аксоні кальмара. Коливання часто асоціюються з простими повторюваними рухами: біг, ходьба, плавання, жування, дихання. М'язи, що відповідають за ці дії, керуються вихідними сигналами нейронів, які, своєю чергою, координуються нейронними схемами головного і спинного мозків. Як відомо, такі нейронні схеми називають центральними модельними генераторами (ЦМГ) [1]. ЦМГ формують різноманітні регулярні ритми, які контролюють поведінку відповідних м'язів. Коливання в різних ділянках мозку також асоціюють з різними патологіями. Зокрема, епілепсія спричиняє велику кількість ритмічної, або подібної на ритмічну, поведінки у великих ділянках мозку. Хвороба Паркінсона є наслідком патологічної ритмічної поведінки в ділянці мозку, яку називають базальним ядром. Коливання також відбуваються у великих ділянках мозку під час анестезії та сну.

Роль коливальної діяльності в сенсорній та пізнавальній поведінці живих організмів є менш дослідженою. Було припущено, що синхронні коливання в корі головного мозку та інформацію про фазу і синхронізацію, яка в ній міститься, можна використати для того, щоб описати сенсорні функції головного мозку [2].

¹ Наук. керівник: проф. П.В. Тимошук, д-р техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

Синхронні коливання у вусиках комах покращують здатність розрізняти подібні аромати [3]. Незважаючи на велику кількість публікацій у цьому напрямі, досі роль коливань у пізнанні досліджено недостатньо.

Штучні нейронні осцилятори широко використовують у різних сферах, зокрема для сегментації зображень [4], розпізнавання мови [5], звукового групування [6], розпізнавання об'єктів [7], проектування МЕМС [8] тощо. Плаванням у п'явок [9], міногів [10] та інших тварин керує низка сегментарних осциляторів [11]. Для імітації нейронних осциляторів було запропоновано багато математичних моделей [12, 13]. Такі моделі застосовують у багатьох типах роботів, які виконують різні ритмічні рухи. Зокрема, Тага [14] і Кімура [15] використали модель осцилятора для опису пересування двоногих і чотириногих роботів. Вільямсон [16] застосував модель такого типу для дослідження гуманоїдного робота. Ці роботи мають подібні схеми керування, а саме: кілька нейронних осциляторів приводять в дію зв'язки робота, тоді як сигнали, які моделюють кути з'єднань та інші змінні стану, подаються у вигляді зворотних зв'язків на входи осциляторів. Перевагою такого типу схем є те, що осцилятор імітує нормальну динаміку керованого об'єкта у природній смузі частот його коливань. Керування за допомогою нейронного осцилятора дає змогу не лише ефективно використовувати енергію, що приводить об'єкт в дію, але й є достатньо надійним. Ферріс та його колеги [17] використали нейронний осцилятор для того, щоб ініціювати коливальні рухи в одинарному, подвійному та потрійному маятниках і показали, що коливання маятника формуються у досить широкому діапазоні зміни значень параметрів керування.

Багато дослідників використовують штучні нейронні осцилятори для керування роботами у різних сферах застосувань: від зміни положення ніг роботів [18] і пересування багатосегментних роботів [19] до контролю рухів їх рук [20]. Штучні нейронні осцилятори можуть адаптуватися до динаміки системи, стабілізуючи її функціонування у разі зміни параметрів системи або збоїв в її роботі. Однією з вад цих систем полягає в тому, що їх дуже важко налагоджувати. Незважаючи на велику кількість наявних теоретичних результатів у цій галузі [21], практичних знань стосовно того, як функціонують осцилятори, а також як потрібно проектувати системи з їхнім використанням сьогодні ще не достатньо. Ця сфера дослідження є на перетині математики, біології, робототехніки та інших наук.

У цьому дослідженні зроблено стислий огляд використання штучних нейронних осциляторів у різних видах роботів. Сформульовано обмеження наявних підходів та невирішені завдання у цій галузі.

Моделювання штучних нейронних осциляторів. Під час імітації функціонування нейронних осциляторів доводиться вирішувати такі дві вирішальні проблеми: 1) яка модель описує динаміку коливань кожного нейрона у формі так званих шипів та вибухів? 2) як з'єднуються нейрони? Невідповідний вибір моделі окремого нейрона або з'єднань між нейронами може призводити до результатів, які не мають нічого спільного з інформацією, яка обробляється біологічними нейронами. Для отримання відповідей на поставлені запитання було порівняно найбільш відомі моделі нейронних осциляторів, які формують коливання у вигляді шипів та вибухів [22, 23]. Було встановлено, що жодна з відомих моделей нейронних осциляторів не здатна імітувати усі відомі 20 форм коливань, оскільки

ки деякі з їх нейрообчислювальних властивостей є взаємовиключними. Зокрема, нейрон не може бути одночасно інтегратором і резонатором. Однак є моделі, які можуть адаптуватись для формування кожного з таких коливань. Зокрема, усі форми коливань можна отримати, використовуючи модель нейрона, яку описано системою двох звичайних диференціальних рівнянь виду [28]:

$$\dot{v} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I, \quad (1 \text{ а})$$

$$\dot{u} = a(bv - u) \quad (1 \text{ б})$$

з описом додаткового післяпікового скидання у формі:

$$\begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d, \end{cases} \text{ якщо } v \geq 30 \text{ mV}, \quad (1 \text{ в})$$

де: v і u – безрозмірні змінні, a , b , c і d – безрозмірні параметри. Змінна v становить потенціал мембрани нейрона, а змінна u – мембранне відновлення. При цьому змінна u моделює так звану активацію іонних струмів K^+ і дезактивацію іонних струмів Na^+ , а також забезпечує наявність негативного зворотного зв'язку по v . Після досягнення коливанням у формі шипа своєї вершини (+30 мВ) потенціал мембрани і змінна мембранного відновлення скидаються згідно з (1 в). Якщо величина v перевищує значення +30 мВ, тоді вона спочатку скидається до +30 мВ, а потім до c таким чином, щоб величини усіх шипів були однаковими. Змінна I моделює постійні синаптичні або зовнішні струми.

Частина $0.04v^2 + 5v + 140$ рівняння (1 а) вибирається так, щоб величина v мала розмірність мВ, а час – мс. Зазначимо, що напруга +30 мВ в (1 в) не є пороговою, а є піком коливання у формі шипа. Величина порогової напруги моделі знаходиться між -70 мВ і -50 мВ і є динамічною, як у біологічних нейронах. За відповідного вибору параметрів a , b , c і d модель може генерувати коливання усіх відомих видів нейронів кори головного мозку [23]. Для імітації функціонування нейрона протягом 1мс модель потребує 13 операцій з плаваючою комою, а тому є досить ефективною під час імітації мереж нейронів великої розмірності. Коли $(a, b, c, d) = (0.2, 2, -56, -16)$ і $I = -99$, модель генерує хаотичні коливання. Для досягнення високої точності формування коливань, крок інтегрування за часом τ повинен бути достатньо малим. Модель Іжикевича було використано для імітації функціонування мережі, що містить 100000 нейронів кори головного мозку, які генерують коливання у формі шипів і вибухів із затримками та синхронізацією коливань [24].

Застосування нейронних осциляторів у робототехніці

1. Штучна нейронна мережа керування роботом, який моделює плавання риб. Відомо, що риби характеризуються досконалішою динамікою, ніж штучні підводні транспортні засоби [25]. Вчені та інженери створили різні види роботів, які імітують пересування риб. Для досягнення ефективної динаміки таких роботів використовують два різних способи керування їх механічними з'єднаннями. Один із них – це метод так званого зворотного кінематичного керування, який полягає у спостереженні, фіксації рухів тварин і моделюванні руху робота в реальності. Якщо такий робот містить велику кількість з'єднань, тоді

застосування цього методу має певні вади, зокрема такі, як значна обчислювальна складність і нездатність адаптації до зміни умов задачі. Інший спосіб керування – це так зване біонічне нейромережеве керування.

Пересуванням риби керує область центральної нервової системи, яку моделює ЦМГ (рис. 1). Два ЦМГ, розміщені в кожному сегменті хребта риби, мають взаємно-затримуючі з'єднання і можуть стимулювати бічні м'язи до почергового стискання або розтягування. Спинні входні сигнали, які надходять від головного мозку, відіграють важливу роль у керуванні рухами м'язів риби.

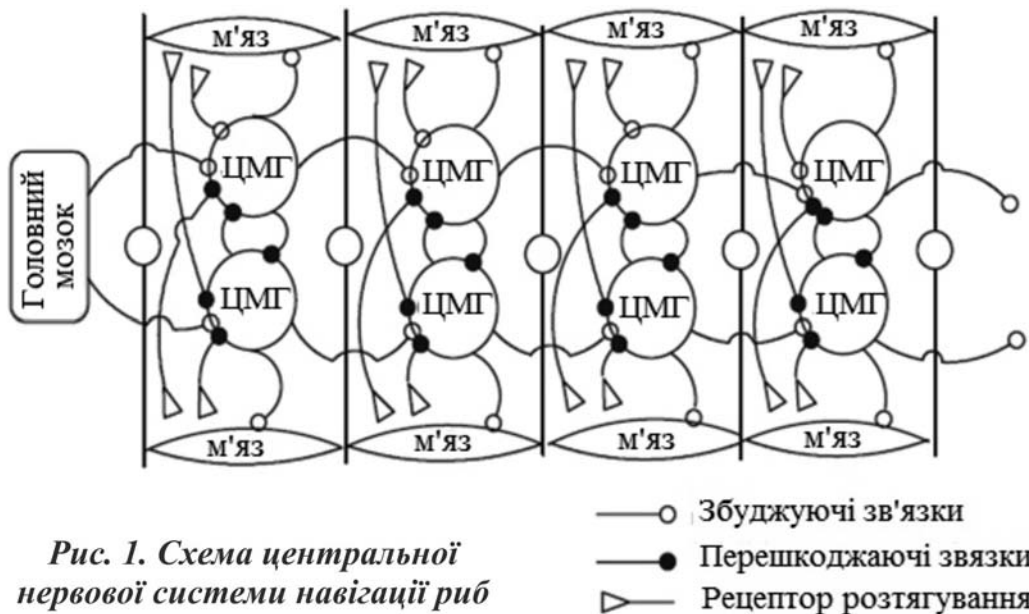


Рис. 1. Схема центральної нервової системи навігації риб

Керування роботами, які імітують рух риб, ґрунтується на використанні моделей штучних нейронних осциляторів. Зокрема, у [25] для цього було запропоновано таку модель штучного нейронного осцилятора:

$$\begin{cases} \dot{u} = \omega v + k \left[-\frac{u}{r} + \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{u}{r} \right) \right], \\ \dot{v} = -\omega u + k \left[-\frac{v}{r} + \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{v}{r} \right) \right], \end{cases} \quad (2)$$

де: u і v – змінні стану осцилятора. ω – кутова частота коливань, r – радіус граничних циклів, k – постійний параметр.

2. Робот, який здійснює коливальні рухи. У [26] описано застосування штучного нейронного осцилятора для керування двозв'язним маятником. Було здійснено багато спроб реалізувати коливальний рух із використанням балки. Деякі з них використовують правила евристичного контролю, а інші застосовують методи попереднього планування. Підхід передбачає підлаштування динаміки нейронного осцилятора до поведінки керованого об'єкта. Модель такого осцилятора [12-14] має вигляд:

$$\tau_1 \dot{x}_1 = c - x_1 - \beta v_1 - \gamma y_2 - \sum_j h_j [g_j]^+ \quad (3 \text{ а})$$

$$\tau_2 \dot{v}_1 = y_1 - v_1 \quad (3 \text{ б})$$

$$\tau_1 \dot{x}_2 = c - x_2 - \beta v_2 - \gamma y_1 - \sum_j h_j [g_j]^- \quad (3 \text{ в})$$

$$\tau_2 \dot{v}_2 = y_2 - v_2 \quad (3 \text{ г})$$

$$y_1 = [x_i]^+ = \max(x_i, 0) \quad (3 \text{ д})$$

$$y_{out} = y_1 - y_2 \quad (3 \text{ е})$$

де: x_i і v_i – змінні стану, β і γ – константи (в [12-14] прийняті значення $\beta=2$, $\gamma=2$). Як вихідний сигнал кожного нейрона використовується додатне значення x_i , а вихідний сигнал цілого осцилятора – як y_{out} . Амплітуда коливання пропорційна константі c . Якщо $c=0$, то коливання – відсутнє. Дві константи часу τ_1 і τ_2 визначають швидкість і форму вихідного сигналу осцилятора. Величина стійких коливань τ_1/τ_2 має знаходитись у діапазоні 0,1-0,5, для якого природна частота осцилятора ω_n пропорційна до $1/\tau_1$. Вхідні сигнали застосовуються до осцилятора через змінні g_j і зважені h_j . Вхідні сигнали налаштовані таким чином, щоб завжди перешкоджати нейрону, застосовуючи позитивну частину $[g_j]^+$ до одного нейрона і негативну частину $[g_j]^- = -\min(g_j, 0)$ до іншого.

Змінні x_i , v_i і y_i ($i=1, 2$) – це мембранний потенціал, самогальмування і вихідний сигнал кожного нейрона. Кожний нейрон і отримує ззовні гальмуючий вхідний сигнал $-g(\pm u)$, взаємне гальмування $-y_j = -ag$ ($j \neq i$) і збуджуючий вхідний сигнал c . Вхідні та вихідні сигнали осцилятора представлені відповідно як u і y_{out} . Взаємне гальмування та самогальмування нейронів викликають свого роду релаксаційні коливання, навіть за відсутності зовнішнього вхідного сигналу u . Коливальну частоту в такому разі визначають параметри осцилятора. З іншого боку, якщо періодичний сигнал надається нейронному осцилятору як сенсорний сигнал зворотного зв'язку u , то вихідний сигнал y_{out} осцилятора припиняється вхідним сигналом.

Об'єкт, керований нейронним осцилятором, – це двозв'язний, збуджуючий маятник (рис. 2). Маятник і осцилятор пов'язані так, як показано на рис. 3.

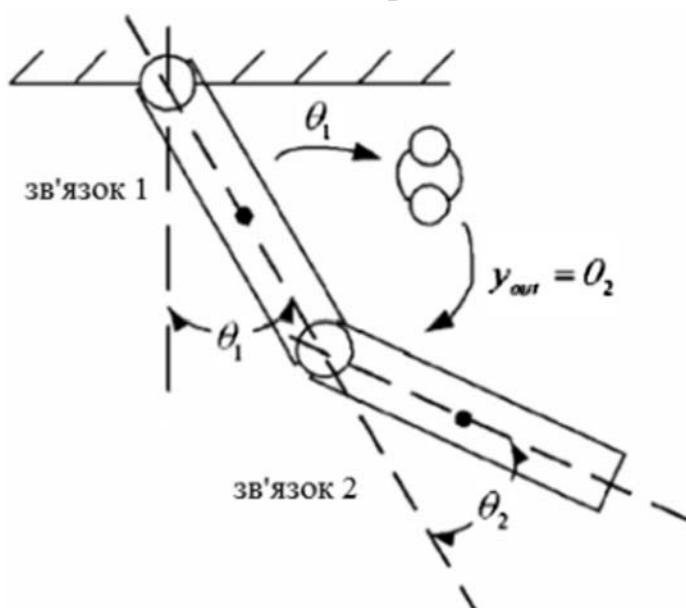


Рис. 2. Збуджувальний двозв'язний маятник



Рис. 3. Блок-схема об'єднаної системи

Кут θ_1 , який налаштовується кутовим кодером, відправляється осцилятору зі зворотним зв'язком H . Вихідні сигнали осцилятора відправляються допоміжному мотору, який прикріплений до нижнього з'єднання, з вихідними сигналами h , визначаючи відносний кут θ_2 нижнього з'єднання.

У роботі [27] описано контрольну схему для робота з горизонтальною балкою, який виконує коливальний рух. Він використовує адаптивну здатність осцилятора Матсуоки. Система невід'ємно має два стійкі граничні цикли: гойдання назад-вперед і гігантське колювання. Осцилятор намагається пристосуватися до природної динаміки маятника, і це надає можливість роботів здійснювати колювання з фіксованими значеннями параметрів нейронного осцилятора.

3. Двоногий ходячий робот. Як відомо, створення двоногого ходячого робота – складне завдання. Опис і обчислення об'єднаних траєкторій – загальноприйнятий спосіб керування двигуном сервомотора, який рухає гуманоїдами [28]. У більшості випадків коефіцієнти, що описують траєкторію, вираховують, базуючись на моделях роботів і критеріях стабільності. Наприклад, дослідницька група Таканіші в університеті Васеда представила гуманоїда WABIAN, де траєкторії рук, ніг і ТНМ (Точка Нульового Моменту) (ZMP) були описані рядами Фур'є [29]. Коефіцієнти було визначено у моделюванні з такими значеннями, щоб виконувалась умова ТНМ [30]. Вадю цього підходу є те, що треба ідентифікувати детальну і дійсну модель цільової системи, а зміни в цільовій системі потребують зміни цієї моделі.

Інший добре обґрунтований підхід для отримання заданих траєкторій, який з'явився внаслідок вивчення хребетних тварин, – ЦМГ. Для побудови структури з властивостями, схожими на властивості нейронних осциляторів, притаманних тваринам, було запропоновано кілька математичних моделей (наприклад, [31-43]). Матсуока запропонував математичну модель ЦМГ і продемонстрував, що комбінація простих нейронних моделей може породжувати нейронну діяльність для двоногого пересування. Цю модель було застосовано для декількох моделювань двоногих роботів (наприклад, [34]), а також використано для реальних роботів (наприклад [35]). Певною проблемою у застосуваннях моделі ЦМГ до реальних роботів є визначення ваги нейронних з'єднань. Це є головною причиною частого використання генетичних алгоритмів для вирішення цієї проблеми.

Безмодельний підхід імітації для двоногих ходячих роботів, заснований на нейронному осциляторі, було представлено в [28]. Нейронна архітектура має бі-

ологічну аналогію, яка особливо цікава з пізнавального погляду. Крім того, вона забезпечує дуже легке і природне об'єднання довільних сенсорних вхідних сигналів. У [28] продемонстровано використання фізичного моделювання і еволюційних алгоритмів для ідентифікації відповідних наборів параметрів представленої моделі руху. Ця методологія є незалежною від конкретного типу робота і не потребує детального фізичного аналізу цільової системи. Застосування моделювання і штучної еволюції дає змогу легко адаптувати генерацію руху до будь-яких модифікацій у самій цільовій системі або відповідно до цільового руху.

Нейронний осцилятор виробляє коливання із застосуванням динаміки дискретного часу мережі з двох нейронів. Аспекти динаміки дискретного часу з рекурентною зв'язністю були широко вивчені, наприклад, в [36, 37]. Основну ідею цього підходу формулюють Пасеманн, Хілд і Захеді в [38]. Формулу мережевої модифікації наведено нижче:

$$a(t+1) := \tan h(\Omega a(t)), \quad \Omega = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Продemonстровано, що певні конфігурації матриці ваг Ω викликають періодичні чи квазіперіодичні притягнення у фазовому просторі мережі. Ці типи мереж можуть породжувати різні види коливань, які, своєю чергою, можна використати для генерування заданих траєкторій.

Колівання у представлених мережах двох нейронів тепер використовують для генерування траєкторій цього типу. Задану траєкторію окремого з'єднання представляє вихідний сигнал відповідного нейрона. Нейрон активізується від двох синапсів, що надходять від осцилятора з двома нейронами і об'єднуючої змінної, яка представляє відгалуження амплітуди траєкторії. Таким чином, задану траєкторію окремого з'єднання описують три параметри, ω_{j1} , ω_{j2} і θ_j , де ω_{ji} позначає синаптичну вагу, що надходить від нейрона $i = 1, 2$, а θ_j – об'єднуюча схильність j . На рис. 4 зображено нейронну топологію мережі контролера.

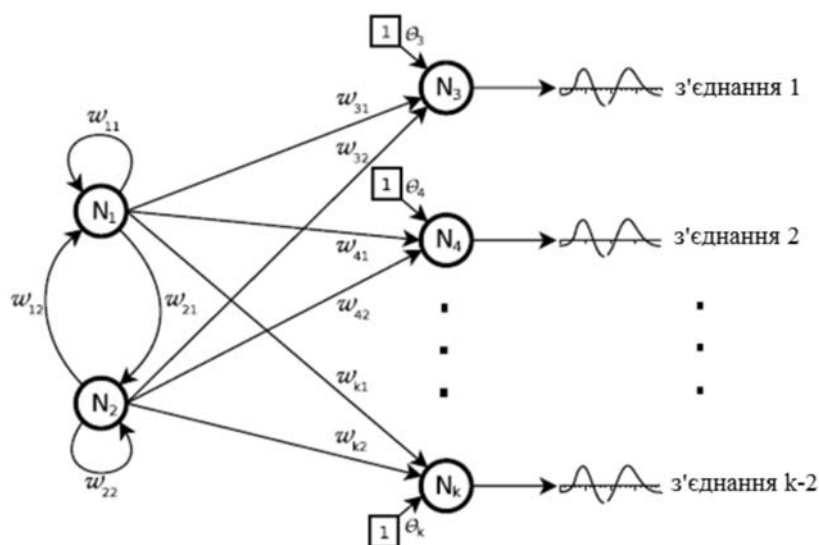


Рис. 4. Топологія контролера нейронної мережі. Задану траєкторію кожного з'єднання дає відповідний нейрон, який отримує свою активацію від двох нейронів $N1, N2$, що коливаються, і об'єднуючої змінної θ_j

Висновки. У цьому дослідженні розглянуто деякі сфери застосування штучних нейронних осциляторів у робототехніці: від зміни положення ніг роботів і пересування багатосегментних істот до контролю рухів рук. Осцилятори використовують у всіх цих випадках, тому що вони можуть пристосовуватися до динаміки системи, надаючи їй адекватну поведінку, незважаючи на змінні параметри системи або порушення нормальної роботи.

Використання роботів змушує всебічно розуміти функціонування системи. Усі компоненти контрольної системи повинні бути на місці, щоб робот працював безпомилково. Наприклад, у випадку пересування необхідно правильно вирішувати проблему ритмічного коливання, координації між ступенями свободи, контролю рівноваги і модуляції швидкості та напрямку. Ця вимога скорочує ризик хибного припущення, що деякі ключові обчислення виконує інший компонент, ніж той, який необхідно.

Однією з головних актуальних дослідницьких тем є розвиток серйозної методології і теоретичного підґрунтя для проектування ЦМГ. Ґрунтовні теоретичні підходи були розвинені для аналізу систем зв'язаних осциляторів [39, 40], але багатьох із цих інструментів ще не достатньо для того, щоб повністю проектувати ЦМГ для специфічних завдань, а саме: для п'яти завдань проектування зі списку в [41]. Необхідно розробити математичні інструменти для синтезу диспетчерів, заснованих на ЦМГ, які показують певні бажані характеристики сигналу даних для специфічної автоматичної структури [41].

Поняття взаємного з'єднання ЦМГ і механічного тіла є дуже важливим у робототехніці. Зазвичай корисно пристосувати ходьбу робота до частот, наприклад, щоб мінімізувати енергоспоживання [41]. Роботу на пасивних або динамічних елементах споживання можна, до прикладу, подивитися в [42]. У багатьох випадках ЦМГ із взаємним з'єднанням синхронізується з частотою, якщо з'єднання від тіла до ЦМГ досить сильне, порівняно з різницею між резонуючою частотою і власною частотою ЦМГ. В узагальнених випадках, можливо, вартуватиме додати частотну адаптацію до ЦМГ. У [43] розвинено такий метод, використавши адаптивні частотні осцилятори (опис можна знайти в роботах [39, 40]). Вірогідно, що біологічні ЦМГ мають подібні механізми адаптації для того, щоб пристосовуватися до зміни властивостей тіла протягом його росту. Є підтвердження того, що біологічні ЦМГ здатні до деякої пластичності. Це дивовижні адаптаційні здатності з погляду робототехніки, і було б дуже цікаво та корисно зрозуміти їхні основні організаційні принципи.

Прогрес у фундаментальному розумінні функціонування ЦМГ допомагатиме не лише біології та робототехніці, але також впливатиме і на розвиток медицини – покращення лікування хворих на ушкодження хребта (наприклад, використовуючи електричне стимулювання).

Література

1. **Marder E.** Principles of rhythmic motor pattern generation / E. Marder, R.L. Calabrese // *Physiological Reviews*, 1996. – P. 687-717.
2. **Gray C.M.** Synchronous oscillations in neuronal systems: mechanisms and functions / C.M. Gray // *J. Computat. Neurosci.* – 1994. – № 1. – P. 11-38.
3. **Stopfer M.** Impaired odour discrimination on desynchronization of odour-encoding neural assemblies / S. Bhagavan, B.H. Smith, G. Laurent // *Nature*. – 1997. – № 390. – P. 70-74.

4. **Chen K.** A dynamically coupled neural oscillator network for image segmentation / K. Chen, D. Wang // *Neural Networks*. – 2002. – № 15 (3). – P. 423-439.
5. **Brown G.J.** A neural oscillator sound separator for missing data speech recognition / K. Chen, D. Wang // *Proc. IJCNN*. – 2001. – № 4. – P. 2907-2912.
6. **Brown G.** Are neural oscillators the substrate of auditory grouping? / G. Brown, M. Cooke // *Proc. ESCA ETRW Auditory Basis of Speech Perception (this volume)* 1996. – P. 111-118.
7. **Ursino M.** Object segmentation and recovery via neural oscillators implementing the similarity and prior knowledge gestalt rules / M. Ursino, E. Magosso, G. – Emiliano La Cara, C. Cuppini // *BioSystems*. – 2006. – № 85. – P. 201-218.
8. **Hoppensteadt F.C.** Synchronization of MEMS Resonators and Mechanical Neurocomputing / F.C. Hoppensteadt, E.M. Izhikevich // *IEEE Trans. Circuits and Systems I*. – 2001. – № 48 (2) – PP. 133-138.
9. **Broduehrer P.D.** Neuronal control of leech swimming / P.D. Broduehrer, E.A. Debski, B.A. O'Gara, W.O. Friesen // *J. Neurobiology*. – 1995. – № 27. – P. 403- 418.
10. **Cohen A.H.** Modelling of intersegmental coordination in the lam prey central pattern generator for locomotion / A.H. Cohen, G.B. Ermentrout, T. Kiemel, N. Kopell, K.A. Sigvardt, T.L. Williams // *Trends Neurosci*. – 1992. – № 15(11). – P. 434-8.
11. **Cohen A.H.** Neural Control of Rhythmic Movements in Vertebrates / A.H. Cohen, S. Rosignol, S. Grillner // New-York, Wiley. – 1988. – P. 134-138.
12. **Matsuoka K.** Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation / K. Matsuoka // *Biological Cybernetics*. – 1985. – № 52. – P. 367-376.
13. **Matsuoka K.** Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators / K. Matsuoka // *Biological Cybernetics*. – 1987. – № 56. – P. 345-353.
14. **Taga G.** A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion / G. Taga // *I. Emergence of basic gait, Biological Cybernetics*. – 1995. – № 73. – P. 97-111.
15. **Kimura H.** Dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillators / H. Kimura, K. Sakurama, S. Akiyama // In: *Proceedings of IROS '98*. – 1998. – № 1. – P. 50– 57.
16. **Williamson M.M.** Robot Arm Control Exploiting Natural Dynamics / M.M. Williamson // PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999. – P. 153–157.
17. **Ferris D.P.** Artificial neural oscillators as controllers for locomotion simulation and robotic exoskeletons / D.P. Ferris, T.L. Viant, R.J. Campbell // *Fourth World Congress of Biomechanics*. – 2002. – P. 221-228.
18. **Ijspeert A.J.** From lampreys to salamanders: Evolving neural controllers for swimming and walking / A.J. Ijspeert, J. Hallam, and D. Willshaw // In *Fifth Intl Conf on Simulation of Adaptive Behavior*, 1998. – PP. 390-399.
19. **Miyakoshi S.** Juggling control using neural oscillators / S. Miyakoshi, M. Yamakita, K. Furuta // In *Proc. IEEE/RSJ Intl Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS-94)* 1994. – № 2. – P. 1186-1193.
20. **Ermentrout B.** Learning of phase lags in coupled oscillators / B. Ermentrout, N. Kopell // *Neural Computation*. – 1994. – № 6(2). – P. 225– 241.
21. **Murray A.E.** Asynchronous VLSI neural networks using pulse-stream arithmetic / A.E. Murray, A. V.W. Swith // *IEEE J. Solid-State Circuits*. – 1988. – № 1. 23. – P. 688-697.
22. **Gerstner W.** Spiking Neuron Models / W. Gerstner, W.M. Kistler // Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press. – 2002.
23. **Izhikevich E.M.** Simple model of spiking neurons / E.M. Izhikevich // *IEEE Trans. Neural Networks*. – 2003. – № 14. – P. 1569-1572.
24. **Izhikevich E.M.** Spike-timing dynamics of neuronal groups / E.M. Izhikevich, J.A. Gally, and G.M. Edelman // *Cerebral Cortex*. – 2004. – № 14. – P. 933-944.
25. **Zhang D.** Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion / D. Zhang, D. Hu, L. Shen, H. Xie // *Neurocomputing*. – 2008. – № 71. – P. 648-654.
26. **Matsuoka K.** A giant swing robot using a neural oscillator / K. Matsuoka, N. Ohyama, A. Watanabe, M. Ooshima // *International Congress Series*. – 2006. – № 1291. – P. 153– 156.
27. **Takashima S.** Control of gymnast on a high bar / S. Takashima // In: *Proceedings of IROS '91*. – 1991. – № 3. – P. 1424– 1429.
28. **Hein D.** Evolution of Biped Walking Using Neural Oscillators and Physical Simulation / D. Hein, M. Hild and R. Berger // *Source RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI*. – 2008. – P. 433-440.

29. Hashimoto S. Humanoid Robots in Waseda University – Hadaly-2 and WABIAN / S. Hashimoto, S. Narita, H. Kasahara et al. // Auton. Robots. – 2002. – № 12(1). – P. 25-38.
30. Vukobratović M. Zero-Moment Point – Thirty Five Years of its Life / M. Vukobratović, B. Borovac // International Journal of Humanoid Robots. – 2004. – № 1(1). – P. 157-173.
31. Grillner S. Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates / S. Grillner // Science. – 1985. – № 228(4696). – P. 143-149.
32. Grillner S. Neural Networks for Vertebrate Locomotion / S. Grillner // j-SCI-AMER. – 1996. – № 274(1). – P. 73-79.
33. Ijspeert J.A. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks / A.J. Ijspeert // M. Arbib (Ed.). In: Locomotion, Vertebrate. 2nd edn. MIT Press. – 2002. – P. 649-654.
34. Miyakoshi S. Three Dimensional Bipedal Stepping Motion Using Neural Oscillators – Towards Humanoid Motion in the Real World / S. Miyakoshi, G. Taga, Y. Kuniyoshi, A. Nagakubo // In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1998. – P. 149-152.
35. Endo G. Experimental Studies of a Neural Oscillator for Biped Locomotion with QRIO / G. Endo, J. Nakanishi, J. Morimoto, G. Cheng // In: IEEE 2005: International Conference on Robotics & Automation. – 2005. – P. 233-239.
36. Chapeau-Blondeau F. Stable, Oscillatory, and Chaotic Regimes in the Dynamics of Small Neural Networks with Delay / F. Chapeau-Blondeau, G.A. Chauvet // Neural Networks. – 1992. – № 5(5). – P. 239-234.
37. Haschke R. Controlling Oscillatory Behavior of a Two Neuron Recurrent Neural Network Using Inputs / R. Haschke, J.J. Steil, H. Ritter // In: Proc. of the Int. Conf. on Artificial Neural Networks (ICANN), Wien, Austria. – 2001. – P. 143-149.
38. Pasemann F. SO (2)-Networks as Neural Oscillators / F. Pasemann, M. Hild, K. Zahedi // In: IWANN. – 2003. – № 1. – P. 144-151.
39. Nishii J. A learning model for oscillatory networks / J. Nishii // Neural Networks. – 1998. – № 11. – P. 249-257.
40. Nishii J. Learning model for coupled neural oscillators / J. Nishii // Network: Comput. Neural Syst. – 1999. – № 10. – P. 213-226.
41. Ijspeert A.J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review / A.J. Ijspeert // Preprint of Neural Networks. – 2008. – № 21/4. – P. 642-653.
42. Collins S. Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers / S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake & M. Wisse // Science. – 2005. – № 307(5712). – P. 1082-1085.
43. Buchli J. Finding resonance: Adaptive frequency oscillators for dynamic legged locomotion / J. Buchli, F. Iida, A.J. Ijspeert // In Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS2006). – 2006. – P. 3903-3909.

Патерега Ю.И. Особенности использования искусственных нейронных осцилляторов в робототехнике

Сжато рассмотрено использование искусственных нейронных осцилляторов в разных типах роботов. В частности, рассмотрены роботы, которые моделируют движение рыб, роботы, которые осуществляют колебательные движения, а также роботы, состоятельные имитировать ходьбу на двух конечностях. Сформулированы актуальные вопросы в этой отрасли исследований.

Ключевые слова: искусственный нейронный осциллятор, центральный модельный генератор, "рыбный" робот, робот, который осуществляет колебательные движения, двуногий ходящий робот.

Paterega Yu.I. Features using artificial neural oscillators in robotics

This paper presents brief review of using artificial neural oscillators in some types of robots. Particular fish-robots, giant swing robots, biped walking robots are considered. Open questions in this field of investigations are formulated.

Keywords: artificial neural oscillator, central pattern generator, fish-robot, giant swing robot, biped walking robot.