A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cultures

J.M. Ferrández ^{1,2} V. Lorente² J.M. Cuadra⁴ F. dela Paz ⁴ José Ramón Álvarez-Sánchez ⁴ E. Fernández^{1,3}

Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Alicante, Spain

Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain

CIBER-BBN, Spain

Departamento de Inteligencia Artificial, UNED, Spain

5th International Conference on Hybrid Artificial Intelligence

J.M. Ferrández , V. Lorente, J.M. Cuadra, F. delaPaz , 👘 A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cu

Systems, 2010

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

・ 同・ ・ ヨ・

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨ

Objectives of this research

 To analyze the computing capabilities of human neuroblastoma cultured cells.

• To define connection schemes for controlling a robot behavior.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

マロト イヨト イヨト

Objectives of this research

- To analyze the computing capabilities of human neuroblastoma cultured cells.
- To define connection schemes for controlling a robot behavior.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

(1日) (1日) (1日)

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

- Long-term potentiation (LTP) is an enhancement in signal transmission between two neurons stimulated synchronously (Hebb).
 - Calcium concentration has to be over a threshold in postsynaptic neuron.
 - It is related to synaptic plasticity.
- Tetanization consists on a high-frequency sequence of individual stimulations of a neuron.
- Tetanization induces NMDA receptor-dependant long-term potentiation (LTP).
 - Increase transmitter release (post-tetanic potentiation).
 Produce a change in vesicle exocytosis.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

- Long-term potentiation (LTP) is an enhancement in signal transmission between two neurons stimulated synchronously (Hebb).
 - Calcium concentration has to be over a threshold in postsynaptic neuron.
 - It is related to synaptic plasticity.
- Tetanization consists on a high-frequency sequence of individual stimulations of a neuron.
- Tetanization induces NMDA receptor-dependant long-term potentiation (LTP).
 - Increase transmitter release (post-tetanic potentiation).
 Produce a change in vesicle exocytosis.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

- Long-term potentiation (LTP) is an enhancement in signal transmission between two neurons stimulated synchronously (Hebb).
 - Calcium concentration has to be over a threshold in postsynaptic neuron.
 - It is related to synaptic plasticity.
- Tetanization consists on a high-frequency sequence of individual stimulations of a neuron.
- Tetanization induces NMDA receptor-dependant long-term potentiation (LTP).
 - Increase transmitter release (post-tetanic potentiation).
 Produce a change in vesicle exocytosis.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

イロト イポト イヨト イヨト

- Long-term potentiation (LTP) is an enhancement in signal transmission between two neurons stimulated synchronously (Hebb).
 - Calcium concentration has to be over a threshold in postsynaptic neuron.
 - It is related to synaptic plasticity.
- Tetanization consists on a high-frequency sequence of individual stimulations of a neuron.
- Tetanization induces NMDA receptor-dependant long-term potentiation (LTP).
 - Increase transmitter release (post-tetanic potentiation).
 - Produce a change in vesicle exocytosis.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

イロト イポト イヨト イヨト

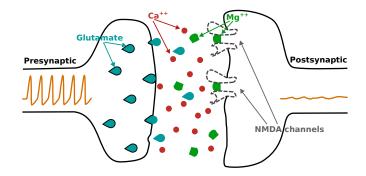
- Long-term potentiation (LTP) is an enhancement in signal transmission between two neurons stimulated synchronously (Hebb).
 - Calcium concentration has to be over a threshold in postsynaptic neuron.
 - It is related to synaptic plasticity.
- Tetanization consists on a high-frequency sequence of individual stimulations of a neuron.
- Tetanization induces NMDA receptor-dependant long-term potentiation (LTP).
 - Increase transmitter release (post-tetanic potentiation).
 - Produce a change in vesicle exocytosis.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

< ロ > < 同 > < 回 > .

-

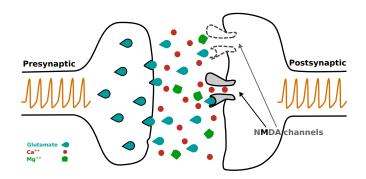
Tetanization physiology 1.



Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

イロト イポト イヨト イヨ

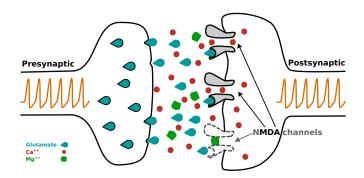
Tetanization physiology 2.



Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

< 日 > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

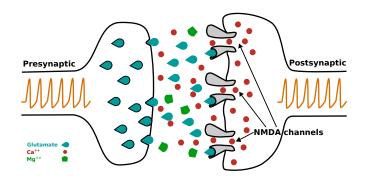
Tetanization physiology 3.



Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

イロト イポト イヨト イヨ

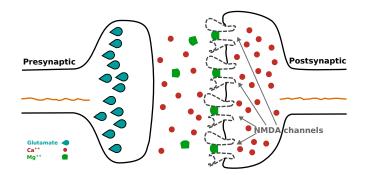
Tetanization physiology 4.



Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

-

Tetanization physiology 5.



Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

(1日) (1日) (1日)

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP

• Human neuroblastoma cultures

- Experimental setup and experiments
 - Basic components
 - Experimental methodology
 - Experimental results
 - Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

4 日 2 4 周 2 4 月 2 4 月 2 4

Human neuroblastoma cultures.

- Tumor neuroblasts, embryonic nervous tissue cells.
 - SH-SY5Y cell line expresses clonal especific human dopamine and NMDA receptors.
 - They respond to different neurotransmitters.
 - They tend to cluster.
- Culture conditions
 - Chemicals to avoid clustering, during 15 days (div), and to induce neuritic growth.
 - 37 degrees humidified incubator.
 - 5% CO₂ and 95% O₂.
 - Serum-free Neurobasal medium.
- Other cells may be used
 - Cortical, hipocampal and retinal tissues.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

4 日 2 4 周 2 4 月 2 4 月 2 4

Human neuroblastoma cultures.

- Tumor neuroblasts, embryonic nervous tissue cells.
 - SH-SY5Y cell line expresses clonal especific human dopamine and NMDA receptors.
 - They respond to different neurotransmitters.
 - They tend to cluster.
- Culture conditions
 - Chemicals to avoid clustering, during 15 days (div), and to induce neuritic growth.
 - 37 degrees humidified incubator.
 - 5% CO₂ and 95% O₂.
 - Serum-free Neurobasal medium.
- Other cells may be used
 - Cortical, hipocampal and retinal tissues.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

Human neuroblastoma cultures.

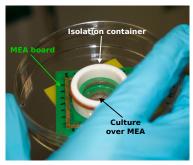
- Tumor neuroblasts, embryonic nervous tissue cells.
 - SH-SY5Y cell line expresses clonal especific human dopamine and NMDA receptors.
 - They respond to different neurotransmitters.
 - They tend to cluster.
- Culture conditions
 - Chemicals to avoid clustering, during 15 days (div), and to induce neuritic growth.
 - 37 degrees humidified incubator.
 - 5% CO₂ and 95% O₂.
 - Serum-free Neurobasal medium.
- Other cells may be used
 - Cortical, hipocampal and retinal tissues.

Objectives of this research Tetanization and LTP Human neuroblastoma cultures

Culture conditions



Incubator



Petri dish containing a cultured MEA

イロト イポト イヨト イヨト

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

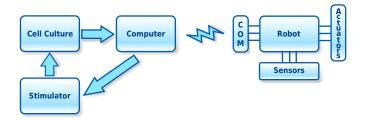
• Basic components

- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

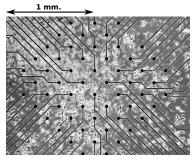
< ロ > < 同 > < 回 > < 回 >

Basic components

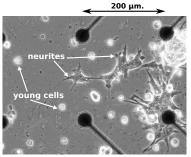


Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Multi electrode array (MEA)



Multi electrode array, 60 electrodes and about 100.000 neurons



MEA detail showing neurons at 2 div with different growth stages

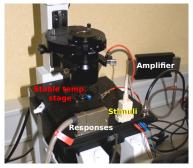
(日) (同) (三) (

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Inverted microscope and hardware 1



Inverted microscope with special stage for MEA applications and MEA stimulator



Microscope stage detail

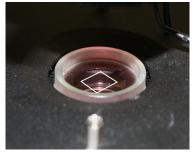
イロト イポト イヨト イヨ

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Inverted microscope and hardware 2



Detail of inverted turret and objectives under the stage



MEA board inside the stage, only isolation container is left outside, MEA is marked out

(日) (同) (三) (三)

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

(1日) (1日) (1日)

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

Basic components

Experimental methodology

- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Counting spikes

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

(日) (同) (三) (三)

• Counting spikes embedded in noisy signals on-line.

- Sampling period 25Khz.
- Compute standard deviation (std. dev.) over 500 ms.
- Set threshold as a multiple, from -1 to -4, of std. dev.
- Activity below threshold is considered as spike.
- Later off-line analisys may be done.

Counting spikes

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

(日) (同) (三) (三)

• Counting spikes embedded in noisy signals on-line.

- Sampling period 25Khz.
- Compute standard deviation (std. dev.) over 500 ms.
- Set threshold as a multiple, from -1 to -4, of std. dev.
- Activity below threshold is considered as spike.
- Later off-line analisys may be done.

Counting spikes

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

イロト イポト イラト イラト

- Counting spikes embedded in noisy signals on-line.
 - Sampling period 25Khz.
 - Compute standard deviation (std. dev.) over 500 ms.
 - Set threshold as a multiple, from -1 to -4, of std. dev.
 - Activity below threshold is considered as spike.
- Later off-line analisys may be done.

Counting spikes

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

- Counting spikes embedded in noisy signals on-line.
 - Sampling period 25Khz.
 - Compute standard deviation (std. dev.) over 500 ms.
 - Set threshold as a multiple, from -1 to -4, of std. dev.
 - Activity below threshold is considered as spike.
- Later off-line analisys may be done.

Counting spikes

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

- Counting spikes embedded in noisy signals on-line.
 - Sampling period 25Khz.
 - Compute standard deviation (std. dev.) over 500 ms.
 - Set threshold as a multiple, from -1 to -4, of std. dev.
 - Activity below threshold is considered as spike.

• Later off-line analisys may be done.

Counting spikes

Basic components Experimental methodology Experimental results

- Counting spikes embedded in noisy signals on-line.
 - Sampling period 25Khz.
 - Compute standard deviation (std. dev.) over 500 ms.
 - Set threshold as a multiple, from -1 to -4, of std. dev.
 - Activity below threshold is considered as spike.
- Later off-line analisys may be done.

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

(1日) (1日) (1日)

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Electro physiological properties

- Network spontaneous activity was recorded for 15 days in two cultures.
- Bursting and spiking activity has been observed.
 - Firing rates varie highly across recordings.
- Synchronized activity between electrodes has been observed.
 - Bursts with large number of spikes at many channels.
 - Durations from miliseconds to seconds.

(日) (同) (三) (三)

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Electro physiological properties

- Network spontaneous activity was recorded for 15 days in two cultures.
- Bursting and spiking activity has been observed.
 - Firing rates varie highly across recordings.
- Synchronized activity between electrodes has been observed.
 - Bursts with large number of spikes at many channels.
 - Durations from miliseconds to seconds.

(日) (同) (三) (三)

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

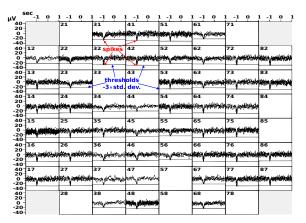
Electro physiological properties

- Network spontaneous activity was recorded for 15 days in two cultures.
- Bursting and spiking activity has been observed.
 - Firing rates varie highly across recordings.
- Synchronized activity between electrodes has been observed.
 - Bursts with large number of spikes at many channels.
 - Durations from miliseconds to seconds.

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Culture spontaneous activity



Network spontaneous activity. Neurons age from 1 to 7 div.

J.M. Ferrández , V. Lorente, J.M. Cuadra, F. delaPaz , 👘 A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cu

< D > < P > < P > < P >

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Tetanization results

Stimuli

- 10 trains of a 100 anodic-first waveform, amplitude 1 Volt.
- Targeting every MEA electrode.
- Responses
 - 3 minutes record before stimulation .
 - 3 minutes record after stimulation.
- Results
 - New connections are created, increment of spikes number.
 - The increased spike ratio persists, LTP is achieved.

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Tetanization results

Stimuli

- 10 trains of a 100 anodic-first waveform, amplitude 1 Volt.
- Targeting every MEA electrode.
- Responses
 - 3 minutes record before stimulation .
 - 3 minutes record after stimulation.
- Results
 - New connections are created, increment of spikes number.
 - The increased spike ratio persists, LTP is achieved.

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

4 日 2 4 周 2 4 月 2 4 月 2 4

Tetanization results

Stimuli

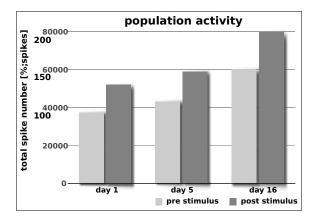
- 10 trains of a 100 anodic-first waveform, amplitude 1 Volt.
- Targeting every MEA electrode.
- Responses
 - 3 minutes record before stimulation .
 - 3 minutes record after stimulation.
- Results
 - New connections are created, increment of spikes number.
 - The increased spike ratio persists, LTP is achieved.

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

4 A > 4 > 1

-

Statistics about tetanization



J.M. Ferrández , V. Lorente, J.M. Cuadra, F. delaPaz , 📃 A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cu

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- 3 Summary and future work
 - Summary
 - Future work

(1日) (1日) (1日)

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

Robotic control for obstacle avoidance

- Sensors information used to selective tetanization.
 - If an obstacle is detected, electrodes corresponding to obstacle position are stimulated.
 - Electrodes selection depends on connections scheme between sensors and actuators.
- Robot direction vector is obtained from network response.
- Preliminary experiments with a robot has been done.

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

Robotic control for obstacle avoidance

- Sensors information used to selective tetanization.
 - If an obstacle is detected, electrodes corresponding to obstacle position are stimulated.
 - Electrodes selection depends on connections scheme between sensors and actuators.
- Robot direction vector is obtained from network response.
- Preliminary experiments with a robot has been done.

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

イロト イポト イヨト イヨト

Robotic control for obstacle avoidance

- Sensors information used to selective tetanization.
 - If an obstacle is detected, electrodes corresponding to obstacle position are stimulated.
 - Electrodes selection depends on connections scheme between sensors and actuators.
- Robot direction vector is obtained from network response.
- Preliminary experiments with a robot has been done.

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

イロト イポト イヨト イヨト

Selective stimulation

21 31 41 51 61 71	21 31 4 5 51 71
12 22 32 42 52 62 72 82	12 22 32 2 5 62 72 82
13 23 33 43 53 63 73 83	13 23 33 3 5 63 73 83
14 24 34 44 54 64 74 84	14 24 34 4 5 64 74 84
15 25 35 5 5 65 75 85	15 25 35 45 55 65 75 85
16 26 36 65 5 66 76 86	16 26 36 46 56 66 76 86
17 27 37 7 5 67 77 87	17 27 37 47 57 67 77 87
28 38 18 55 68 78	28 38 48 58 68 78
21 31 41 51 61 71	21 31 41 51 61 71
12 22 32 42 52 62 72 82	12 22 32 42 52 62 72 82
13 23 33 43 53 63 73 83	13 23 33 43 53 63 73
1 21 31 11 54 64 74 84	14 24 34 44 54 64 74 84
15 25 35 45 55 65 75 85	15 25 35 45 55 45 75 85
26 36 46 56 66 76 86	16 26 36 46 56 66 76 56
17 27 37 47 57 67 77 87	17 27 37 47 57 67 77 87
28 38 48 58 68 78	28 38 48 58 68 78

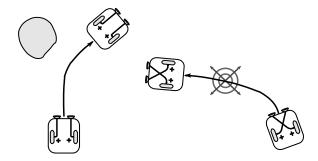
Selective electrode stimulation for collision avoidance, using direct excitatory connections from sensors to actuators.

J.M. Ferrández, V. Lorente, J.M. Cuadra, F. delaPaz, 🔰 A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cu

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Image: Image:

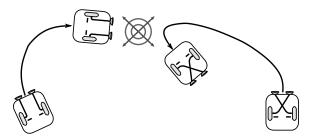
Excitatory connections schemes



J.M. Ferrández, V. Lorente, J.M. Cuadra, F. delaPaz, A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cu

Basic components Experimental methodology Experimental results Proposed robotic control

Inhibitory connections schemes



J.M. Ferrández, V. Lorente, J.M. Cuadra, F. delaPaz, A Hybrid Robotic Control System using Neuroblastoma Cu

Summary Future work

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control
- Summary and future work
 - Summary
 - Future work

Summary Future work

Summary

• Growth and learning tests have been done.

Cultured human neuroblastoma cells can dendrify over a MEA.
LPT can be induced via tetanization.

- Cultured neuroblastoma cells may be used for very simple robot control.
 - Cells may be stimulated selectively to roughly represent sensors information.
 - Cells response may be used to compute robot direction vector.

・ロト ・同ト ・ヨト ・ヨ

Summary Future work

Summary

- Growth and learning tests have been done.
 - Cultured human neuroblastoma cells can dendrify over a MEA.
 LPT can be induced via tetanization.
- Cultured neuroblastoma cells may be used for very simple robot control.
 - Cells may be stimulated selectively to roughly represent sensors information.
 - Cells response may be used to compute robot direction vector.

< 日 > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Summary Future work

Summary

- Growth and learning tests have been done.
 - Cultured human neuroblastoma cells can dendrify over a MEA.
 - LPT can be induced via tetanization.
- Cultured neuroblastoma cells may be used for very simple robot control.
 - Cells may be stimulated selectively to roughly represent sensors information.
 - Cells response may be used to compute robot direction vector.

< 日 > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Summary Future work

Summary

- Growth and learning tests have been done.
 - Cultured human neuroblastoma cells can dendrify over a MEA.
 - LPT can be induced via tetanization.
- Cultured neuroblastoma cells may be used for very simple robot control.
 - Cells may be stimulated selectively to roughly represent sensors information.
 - Cells response may be used to compute robot direction vector.

Summary Future work

Summary

- Growth and learning tests have been done.
 - Cultured human neuroblastoma cells can dendrify over a MEA.
 - LPT can be induced via tetanization.
- Cultured neuroblastoma cells may be used for very simple robot control.
 - Cells may be stimulated selectively to roughly represent sensors information.

• Cells response may be used to compute robot direction vector.

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

Summary Future work

Summary

- Growth and learning tests have been done.
 - Cultured human neuroblastoma cells can dendrify over a MEA.
 - LPT can be induced via tetanization.
- Cultured neuroblastoma cells may be used for very simple robot control.
 - Cells may be stimulated selectively to roughly represent sensors information.
 - Cells response may be used to compute robot direction vector.

・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

Summary Future work

Outline

Training neural cultures

- Objectives of this research
- Tetanization and LTP
- Human neuroblastoma cultures

2 Experimental setup and experiments

- Basic components
- Experimental methodology
- Experimental results
- Proposed robotic control

Summary and future work

- Summary
- Future work

Summary Future work

Future work

- Other simple robotic control implementations, e. g. Braitenberg's vehicles.
- Mixing two or more sensorial systems for more complex taxes,
 - e.g. goal reaching.
 - Using several MEAs, very expensive.
 - Training subpopulations over one MEA, accuracy loss.
 - One sensorial system for cells and the others for conventional hardware.
 - Large spatial resolution through optical stimulation and reading.

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Summary Future work

Future work

- Other simple robotic control implementations, e. g. Braitenberg's vehicles.
- Mixing two or more sensorial systems for more complex taxes,
 - e.g. goal reaching.
 - Using several MEAs, very expensive.
 - Training subpopulations over one MEA, accuracy loss.
 - One sensorial system for cells and the others for conventional hardware.
 - Large spatial resolution through optical stimulation and reading.

Summary Future work

Future work

- Other simple robotic control implementations, e. g. Braitenberg's vehicles.
- Mixing two or more sensorial systems for more complex taxes,
 - e.g. goal reaching.
 - Using several MEAs, very expensive.
 - Training subpopulations over one MEA, accuracy loss.
 - One sensorial system for cells and the others for conventional hardware.
 - Large spatial resolution through optical stimulation and reading.

Summary Future work

Future work

- Other simple robotic control implementations, e. g. Braitenberg's vehicles.
- Mixing two or more sensorial systems for more complex taxes,
 - e.g. goal reaching.
 - Using several MEAs, very expensive.
 - Training subpopulations over one MEA, accuracy loss.
 - One sensorial system for cells and the others for conventional hardware.
 - Large spatial resolution through optical stimulation and reading.

Summary Future work

Future work

- Other simple robotic control implementations, e. g. Braitenberg's vehicles.
- Mixing two or more sensorial systems for more complex taxes,
 - e.g. goal reaching.
 - Using several MEAs, very expensive.
 - Training subpopulations over one MEA, accuracy loss.
 - One sensorial system for cells and the others for conventional hardware.
 - Large spatial resolution through optical stimulation and reading.

・ロト ・ 一日 ・ ・ 日 ・

Summary Future work

Future work

- Other simple robotic control implementations, e. g. Braitenberg's vehicles.
- Mixing two or more sensorial systems for more complex taxes,
 - e.g. goal reaching.
 - Using several MEAs, very expensive.
 - Training subpopulations over one MEA, accuracy loss.
 - One sensorial system for cells and the others for conventional hardware.
 - Large spatial resolution through optical stimulation and reading.