

## 0.1 Учёт энергетических затрат

Для моделирования биологического движения необходимо выяснить, какими принципами руководствуется мозг при выборе траектории для некоторого целевого движения. Существует бесконечное число возможных путей и профилей скорости для перемещения руки из одной точки в другую, и каждая траектория может достигнута несколькими возможными комбинациями углов между сочленениями. При этом нервная и моторно-двигательные системы человека для выбора одной конкретной траектории анализируют большой объем информации, поступающий от всех органов чувств.

В силу того, что нервная система человека есть результат оптимизационных процессов: эволюции, адаптации к условиям среды, обучения, мы постулируем следующий биологический принцип оптимальности.

**Утверждение 1** (Биологический принцип оптимальности). *Выбираемые нервной системой схемы движения являются оптимальными для поставленной задачи.*

Применение данного принципа позволяет не только моделировать движения методами оптимального управления, но и анализировать их причины.

В работе [1] было показано, что оптимизации проводятся с целью уменьшения затрат энергии. Однако общего подхода к формализации энергетических затрат пока не выработано. Так, например, в работе [3] предлагается минимизировать *рывок* схвата, то есть

$$\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{final}}} \left\| \frac{d^3 e^3}{dt^3} \right\|^2 dt \longrightarrow \min,$$

а в работе [5] — изменение крутящего момента

$$\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{final}}} \left\| \frac{d\tau}{dt} \right\|^2 dt \longrightarrow \min. \quad (0.1)$$

Причём существуют и другие менее популярные варианты, например, [2].

Мы будем использовать для формализации энергетических затрат выражение (0.1), поскольку данный критерий напрямую зависит от динамики руки и лучше согласуется с эмпирическими данными, чем модель рывка.

## Список литературы

- [1] M. Jordan E. Todorov. Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, 5(11):1226–1235, 2002.
- [2] C. M. Harris and D. M. Wolpert. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394, August 1998.
- [3] N. Hogan. An organizing principle for a class of voluntary movement. *Journal of Neuroscience*, 4(11):2745–2754, 1984.
- [4] Donald E. Knuth. *The T<sub>E</sub>X Book*. Addison-Wesley Professional, 1986.
- [5] M. Kawato Y. Uno and R. Suzuki. Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61(2):89–101, 1989.
- [6] С. А. Колюбин. *Динамика робототехнических систем*. Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО, Санкт-Петербург, 2017.