

## 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 быть 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 будем придерживаться следующего биологического принципа 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 [?] было показано, что оптимизации проводятся с целью уменьшения затрат энергии. Однако общего подхода к формализации энергетических затрат пока не выработано. Так, например, в работе [?] 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 [?] — 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, [?].

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 минимального рывка [?].