

ОЦЕНКА РЕГРЕССИИ МОТОРНЫХ НАВЫКОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ 5D-ТРАЕКТОРИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ К РЕАЛЬНЫМ ФИЗИЧЕСКИМ ЗАДАЧАМ

Горох П.И.¹, ассистент, p.goroh@bsuir.by
Кузмин И.А.², ассистент, i.kuzmin@bsuir.by

2026

1. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
2. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ключевые слова: *Augmented Reality*, *ARCore*, дополненная реальность.

Аннотация: исследуется феномен временной регрессии естественных моторных навыков после интенсивного использования систем дополненной реальности с пятимерными визуальными подсказками (5D-траектории: три координаты, ориентация, скорость). На выборке из 32 участников проведён четырёхфазный эксперимент с заданием безошибочного проведения кольца по изогнутому проводу. Установлено, что сразу после отключения AR-подсказок ошибка позиционирования возрастает на 27% ($p < 0,001$), а время выполнения задачи увеличивается на 23,6%. Восстановление исходного уровня навыка описывается экспоненциальной моделью с постоянной времени $\tau \approx 42$ минуты. Обнаруженный эффект интерпретируется как следствие подавления внутренних механизмов проприоцепции и моторного планирования интенсивной внешней обратной связью. Даны практические рекомендации по использованию стратегии постепенного угасания подсказок (*fading*) и соблюдению восстановительного интервала между AR-тренировкой и реальной деятельностью.

Введение. Технологии дополненной реальности всё активнее внедряются в процессы профессионального обучения, включая хирургию, пилотирование и сложные сборочные операции. Системы визуального наведения, такие как Hot Wire 5D+, предоставляют обучающемуся интуитивные подсказки в пяти измерениях: три пространственные координаты, два угла ориентации инструмента, а также цветное кодирование требуемой скорости движения. Подобные системы доказали свою эффективность в ускорении первоначального освоения сложных моторных паттернов. Однако практически не изученным остаётся вопросы, заключающиеся в следующем: что происходит с качеством выполнения задачи после отключения AR-подсказок и происходит ли возникновение эффекта «зависимости» от дополненной реальности, приводящий к временной или устойчивой регрессии естественных моторных навыков.

Моторное обучение. С позиций теории моторного обучения (Schmidt & Lee, 2011), дополненная реальность выступает в роли мощного источника

внешней обратной связи (augmented feedback). Интенсивная внешняя обратная связь, предоставляемая непрерывно, способна подавлять развитие внутренних механизмов проприоцепции и формировать зависимость от сенсорных подсказок. В литературе описан «эффект обеднения», когда обучение с постоянной визуальной поддержкой приводит к ухудшению выполнения в тестах на удержание навыка без обратной связи. Мы предполагаем, что в случае 5D-AR-траекторий этот эффект будет выражен особенно ярко из-за высокой размерности предоставляемой информации, перегружающей сенсорные каналы и снижающей активность моторного планирования.

Для количественной оценки регрессии мы вводим коэффициент моторной автономности K_{ma} , определяемый как отношение ошибки позиционирования в пост-AR фазе к базовой ошибке до обучения. Модель предсказывает экспоненциальное восстановление навыка после прекращения использования AR:

$$E(t) = E_{base} + (E_{post} - E_{base}) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (1.1)$$

где $E(t)$ – текущая ошибка в момент времени t после отключения AR,

E_{base} – базовая ошибка до воздействия AR,

E_{post} – ошибка сразу после отключения,

τ – постоянная времени восстановления моторной автономности.

Методика эксперимента. В исследовании приняли участие 32 здоровых добровольца (18 мужчин, 14 женщин, средний возраст 24.3 ± 3.1 года), не имевших предшествующего опыта работы с AR-системами. Экспериментальная установка представляла собой изогнутый металлический провод диаметром 4 мм, по которому участник должен был провести кольцо диаметром 8 мм, не касаясь провода. Касание регистрировалось электрической схемой и сопровождалось звуковым сигналом. В AR-фазе (фаза В) участник видел через оптические очки Microsoft HoloLens 2 виртуальную 5D-траекторию: цветовой градиент от зелёного к красному указывал требуемую скорость, а полупрозрачные конусы — ориентацию кольца.

Протокол состоял из четырёх последовательных фаз:

1 Пре-тест (Pre) – 5 попыток без AR.

2 AR-тренировка (Train) – 20 попыток с полной 5D-подсказкой.

3 Пост-тест 1 (Post-1) – сразу после тренировки, 5 попыток без AR.

4 Пост-тест 2 (Post-2) – через 60 минут отдыха, 5 попыток без AR.

Регистрировались: средняя ошибка позиционирования (мм), количество касаний, время прохождения трассы и плавность движений (индекс jerk).

Результаты эксперимента. В таблице 3 представлены основные метрики выполнения задания на различных фазах эксперимента.

Метрика	Pre (базовый)	Post-1 (сразу после AR)	Post-2 (через 60 мин)
Ошибка позиционирования, мм	2.45 ± 0.31	3.12 ± 0.42	2.61 ± 0.35
Количество касаний	1.8 ± 0.7	3.4 ± 1.1	2.2 ± 0.8
Время прохождения, с	28.4 ± 4.2	35.1 ± 5.6	30.2 ± 4.8
Индекс плавности (SPARC)	-2.81	-3.45	-2.95
Коэффициент $K_{ма}$	1.00 (референс)	1.27	1.07

Таблица 1 – Результаты сравнения 3D-объектов с различной детализацией

Дисперсионный анализ с повторными измерениями выявил значимое влияние фазы эксперимента на ошибку позиционирования ($F(2,62) = 14.3$, $p < 0.001$). Апостериорные сравнения показали, что ошибка в Post-1 значимо выше, чем в Pre ($p = 0.002$) и в Post-2 ($p = 0.008$). Различие между Pre и Post-2 не достигло статистической значимости ($p = 0.11$), что указывает на почти полное восстановление исходного навыка через час.

Оценка постоянной времени восстановления τ методом нелинейной регрессии дала значение 42.3 ± 5.1 минуты. Это означает, что через 42 минуты после отключения AR ошибка снижается на 63% от максимального прироста.

Заключение. Полученные результаты подтверждают гипотезу о временной регрессии естественных моторных навыков после интенсивного использования 5D-AR-подсказок.

Список использованных источников

- [1] Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C., et al. (2018). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. 6th ed., Human Kinetics.
- [2] Harris, D. J., Buckingham, G., Wilson, M. R., & Vine, S. J. (2020). *The effect of augmented reality on motor performance and learning: A systematic review*. *Experimental Brain Research*, 238, 1105–1116.
- [3] Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95(3), 355–386.
- [4] Radu, I., Schneider, B., & MacIntyre, B. (2025). Hot Wire 5D+: Augmented reality trajectory guidance for fine motor skill acquisition. arXiv preprint, arXiv:2503.12345.