

Модель локомоции задних конечностей кошки - ходьба вперед и назад

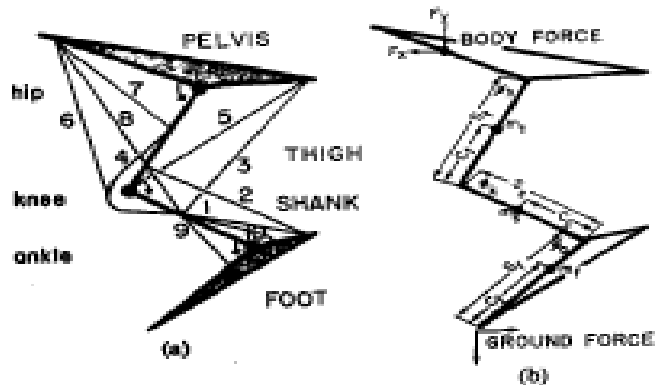
Ляховецкий В.А.¹, Мусиенко П.Е.^{1,2}

¹Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН

² Институт трансляционной биомедицины СПбГУ

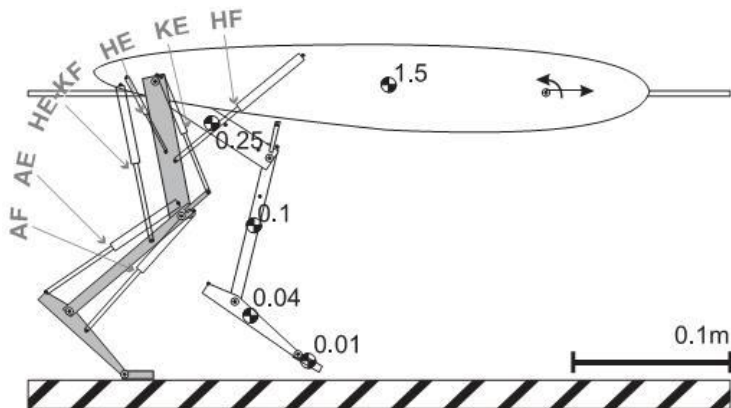
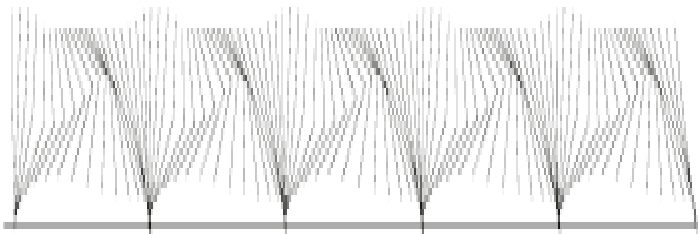
V_la2002@mail.ru

Известные модели



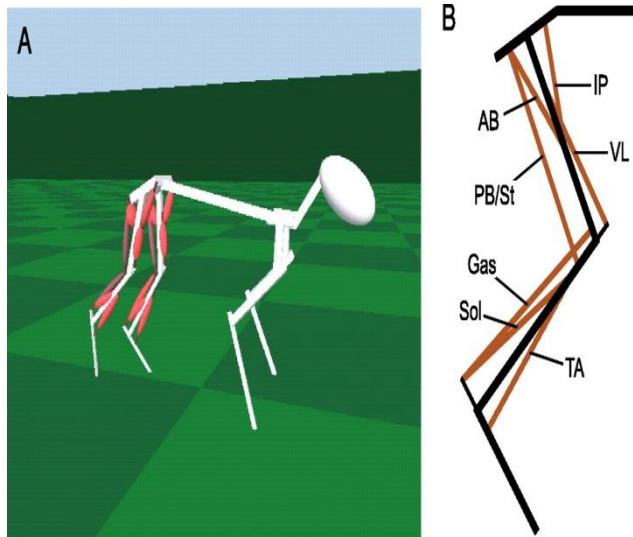
Поддержание позы задними конечностями кошки при небольших отклонениях от начального положения [He et. al, 1991]

Модель шага одной конечности [Wadden, Ekeberg, 1998]

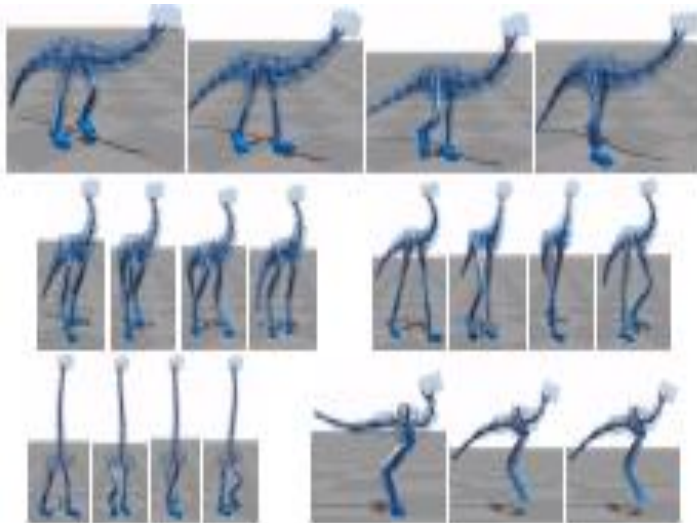


«Плоская» модель. Таз перемещается только в сагиттальной плоскости [Yakovenko et. al, 2004]

Известные модели



Модели становятся трехмерными. В них включается таз, фиксированный, без контроля латеральной стабильности [Ekeberg, Pearson, 2005].



Модель способна к имитации ходьбы вперед любых двуногих существ. Оптимизируемыми параметрами являются не только параметры активации мышц, но и сами точки крепления мышц [Geijteebek et al., 2013]

Цели работы

- обобщение разработанной прежде [Ляховецкий и др., 2015] модели локомоции задних конечностей кошки путем реализации режима ходьбы назад;
- постановка модельных экспериментов ходьбы назад;
- сравнение модельных характеристик ходьбы назад с характеристиками локомоции назад кошек.

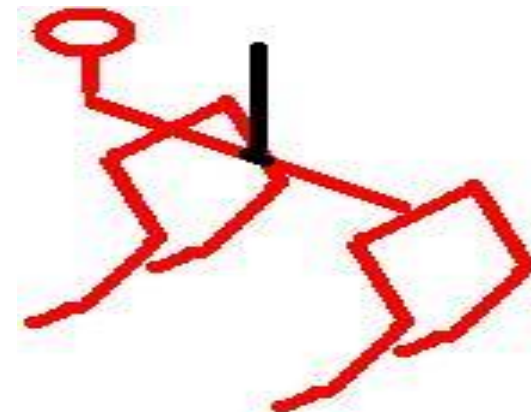
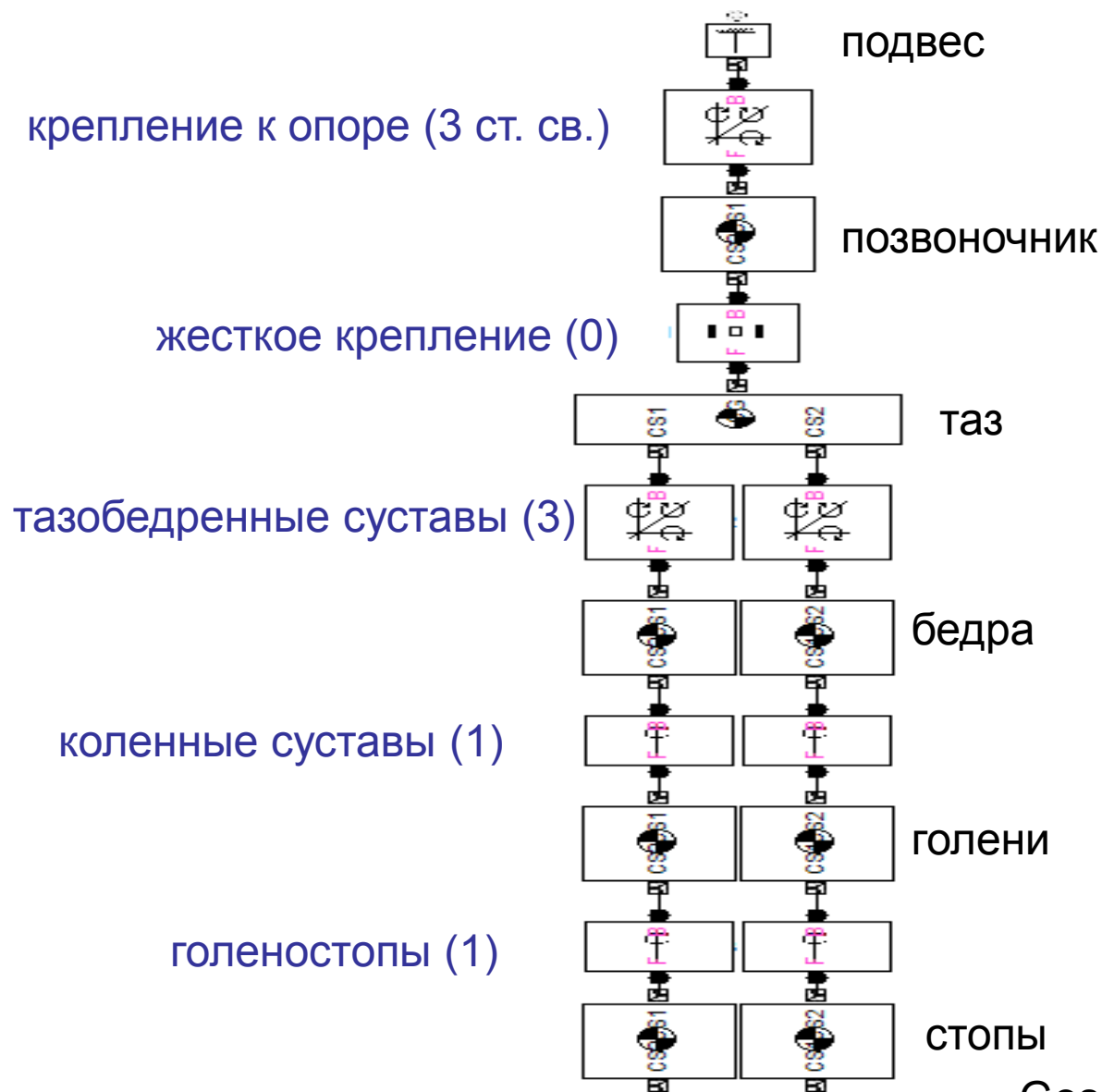
Подсистемы модели

Среда разработки – MatLab R2010b.

Библиотеки имитационного моделирования Simulink.

- Скелетная часть, Simulink\SimMechanics
- Мышечная часть, пакет Virtual Muscle 4.0.1 [Song et al., 2008]
- Тредбан, Simulink\SimMechanics
- Управление мышцами, Simulink\Sources

Скелетная часть модели



Создание мышц

BuildFiberTypes: feline_fiber_types.mat

File Edit Fiber Properties Help

Optimal Sarcomere Length (um)

	Type #1	Type #2	Type #3
Fiber type name	SS	S	F
Recruitment rank	1	2	3
V0.5 (L0/s)	-0.51523	-1.2123	-2.5547
f0.5 (pps)	8.5	20	34
fmin (f0.5)	0.5	0.5	0.5
fmax (f0.5)	2	2	2
Comments	'super-slow' soleus	generic	generic fast-twitch

BuildMuscles: feline_muscle.mat

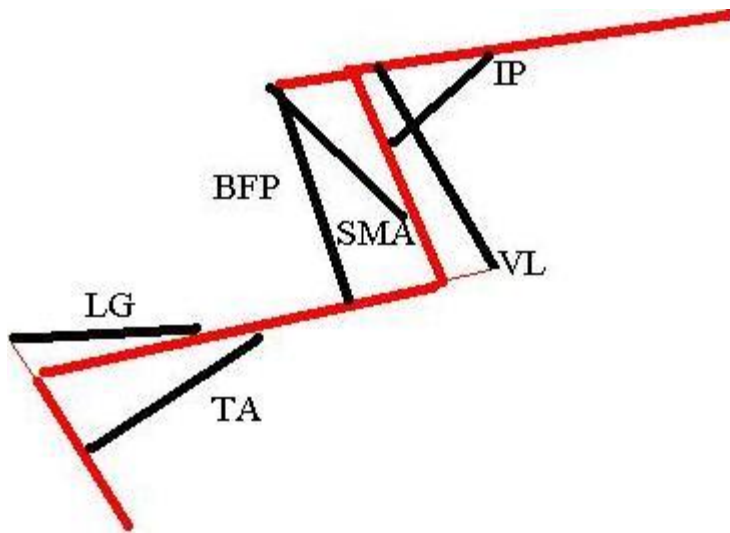
File Edit Muscles Model Help

Fiber Type Database: feline_fiber_types.mat
Clipboard contents: Empty

	Muscle name	Muscle mass (g)	Fascicle Lo (cm)	Muscle PCSA (cm ²)	Muscle Fo (N)	Tendon LoT (cm)	Whole muscle LMax (cm)	Fascicle LMax (Lo)	Ur	Fiber type distribution (PCSA#_Units)				
										SS	S	F		
Muscle #11	BFA	12.3	3.45	3.3634	106.9565	5.01	8.46	1.0626	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #12	SMA	15.33	8.45	1.7115	54.426	1.71	10.16	1.0087	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #13	SMP	22.43	6.2	3.413	108.5323	4.56	10.76	1.0317	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #14	AF	29.62	4.86	5.7497	182.8395	6.84	11.7	1.0607	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #15	TFP	2.06	3	0.6478	20.6	4.5	7.5	1.0647	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #16	RF	11.06	1.92	5.4344	172.8125	7.49	9.4	1.163	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #17	TFA	2.17	2.3	0.89007	28.3043	6.63	8.9	1.1113	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #18	SAA	2.98	8.26	0.34035	10.8232	1.54	9.78	1.0056	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #19	IP	9.7	4.1	2.2319	70.9756	0.02	4.3	1.0441	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-
Muscle #20	SAM	9.9	10.5	0.88949	28.2857	3.9	14.4	1.016	0.8	0/0	0/0	1/4	-	-

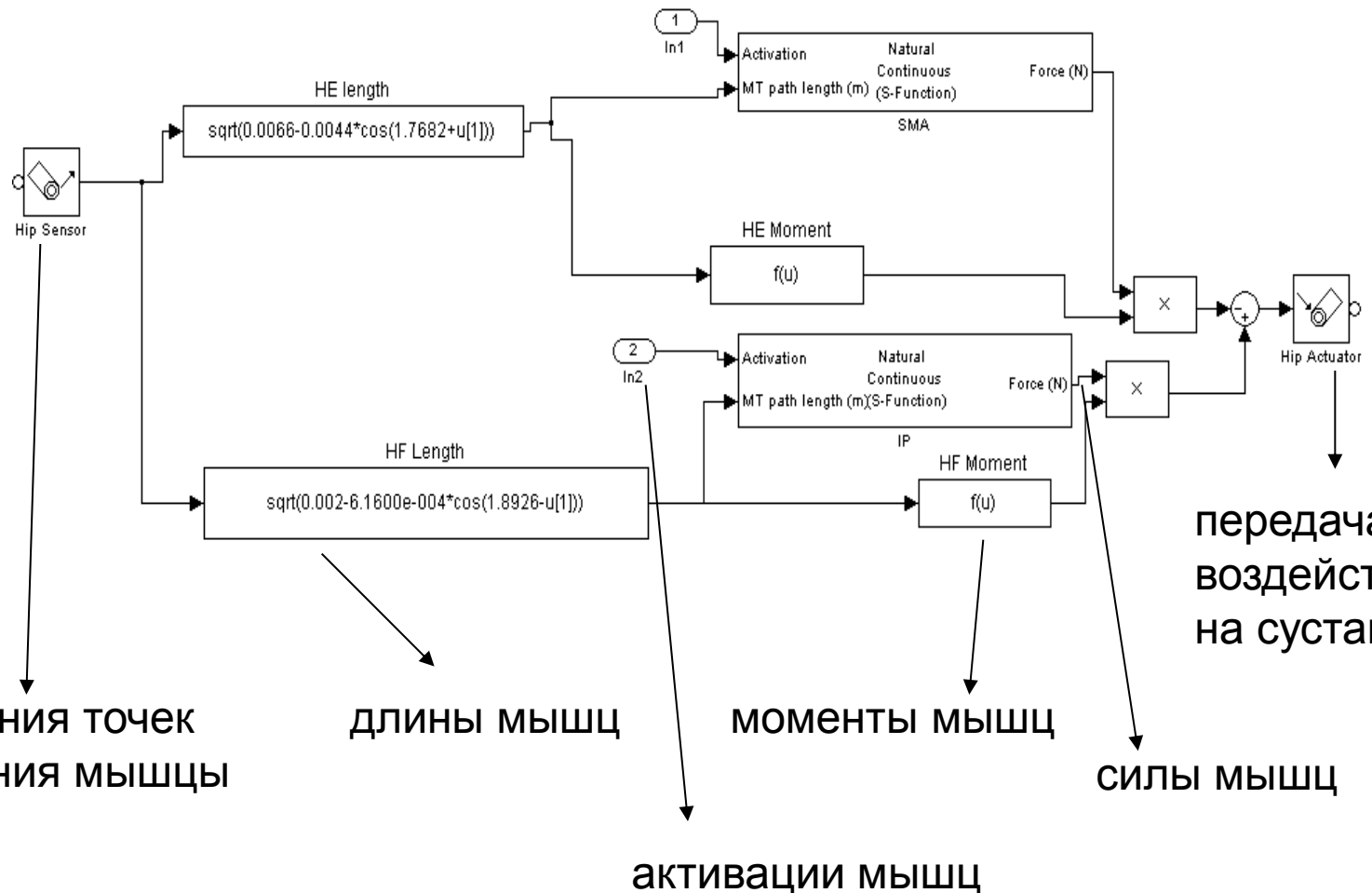
Мышцы модели

Наименование	Тип	Масса, г	Длина волокон брюшка в момент развития максимальной силы, см	Длина сухожилия в момент развития максимальной силы, см	Максимальная длина, см
Semimembranosus Brevis (SMA)	Экстензор бедра	15.33	8.45	1.71	10.16
Iliopsoas (IP)	Флексор бедра	15	4.1	0.02	4.3
Biceps Posterior (BFP)	Экстензор бедра – флексор голени	30.34	3.69	6.25	9.84
Vastus Lateralis (VL)	Экстензор голени	30	2.61	6.43	9.04
Lateral Gastrocnemius (LG)	Экстензор стопы	12.4	2.34	7.19	9.54
Tibialis Anterior (TA)	Флексор стопы	6.47	5.16	3.73	8.9



Расчет параметров мышц производился по [He et al., 1991] с учетом угла перистости мышц. Масса мышц IP и VL взята несколько большей массы, указанной в [He et al., 1991], чтобы отказаться от необходимости включать в рассмотрение другие мышцы-флексоры бедра и колена.

Мышцы модели



положения точек
крепления мышц

длины мышц

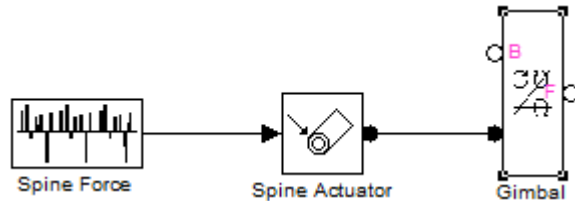
моменты мышц

силы мышц

передача
воздействия
на сустав

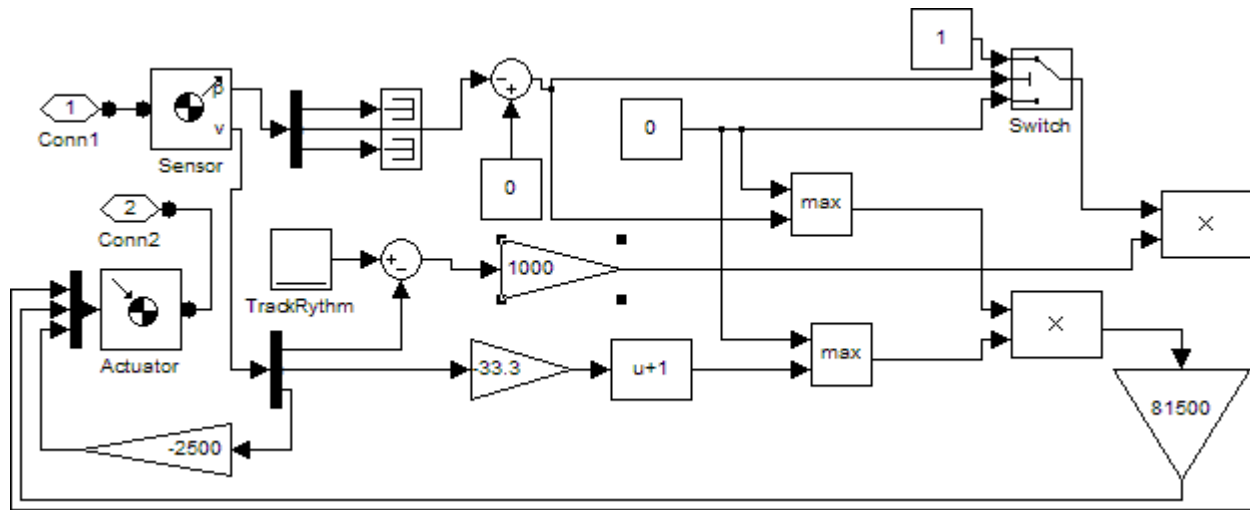
активации мышц

Обобщенная боковая сила



Для компенсации отклонений таза от средней линии введена обобщенная боковая сила, действующая на сегмент позвоночника.

Тредбан



Если стопа касается тредбана, то

для ходьбы вперед: $F_x = 1000 \cdot (x' - v_{\text{track}})$

для ходьбы назад: $F_x = 1000 \cdot (v_{\text{track}} - x')$

x' – скорость движения опорной точки стопы в плоскости тредбана, v_{track} – скорость тредбана, $v_{\text{track}} = 0.1$ м/с.

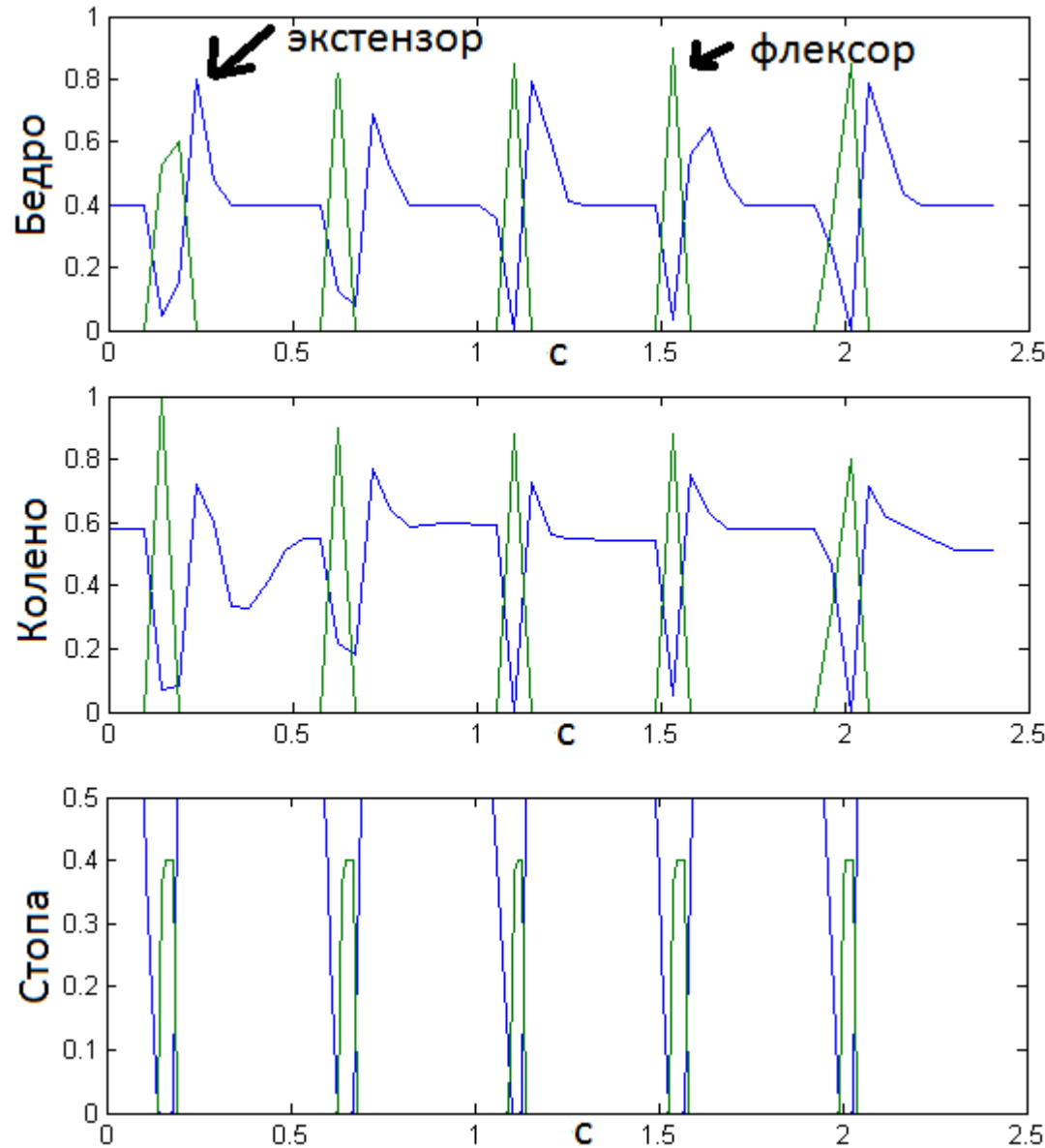
$F_y = 81500 \cdot y' \cdot (33.3 \cdot y' + 1)$

$y > 0$, $y' > 0.03$, F – сила опоры, y – величина проникновения стопы за плоскость опоры, y' – скорость проникновения стопы за плоскость опоры [Geyer, Herr, 2010].

$F_z = -2500 \cdot z'$

z' - скорость движения опорной точки стопы в плоскости, перпендикулярной плоскости тредбана

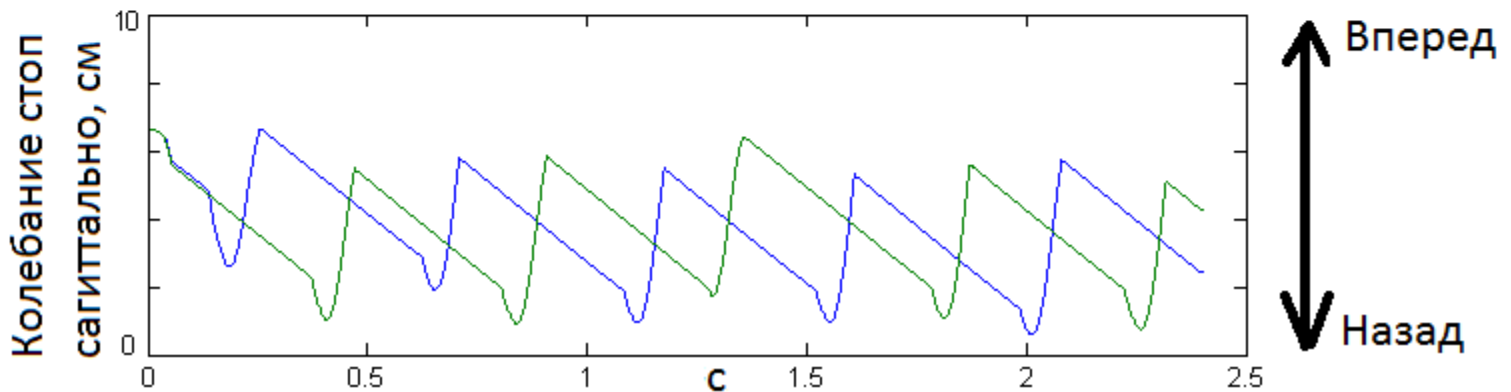
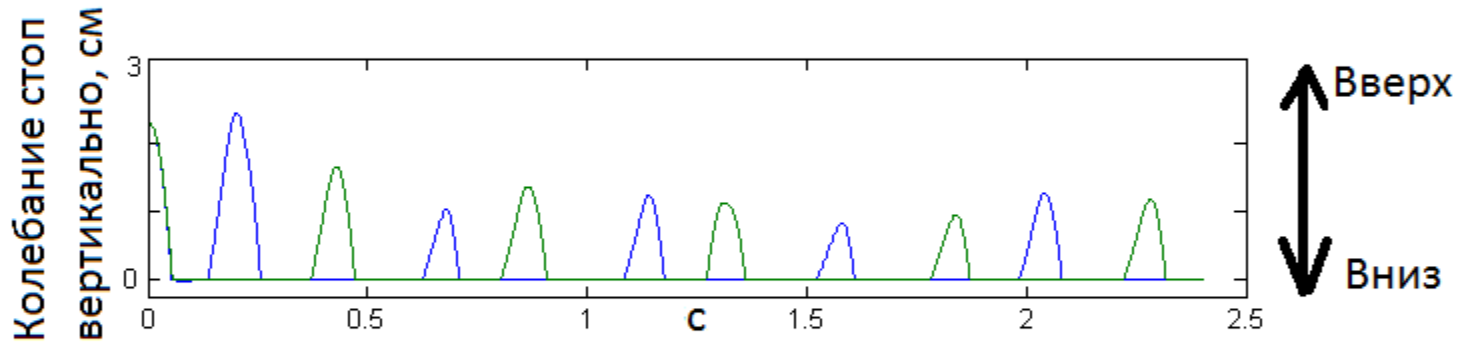
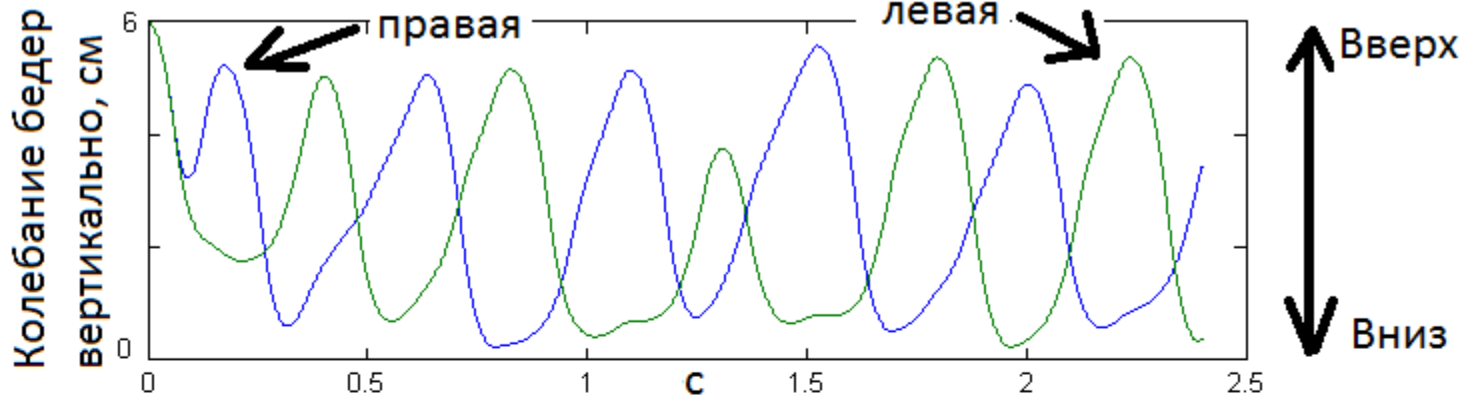
Ходьба вперед



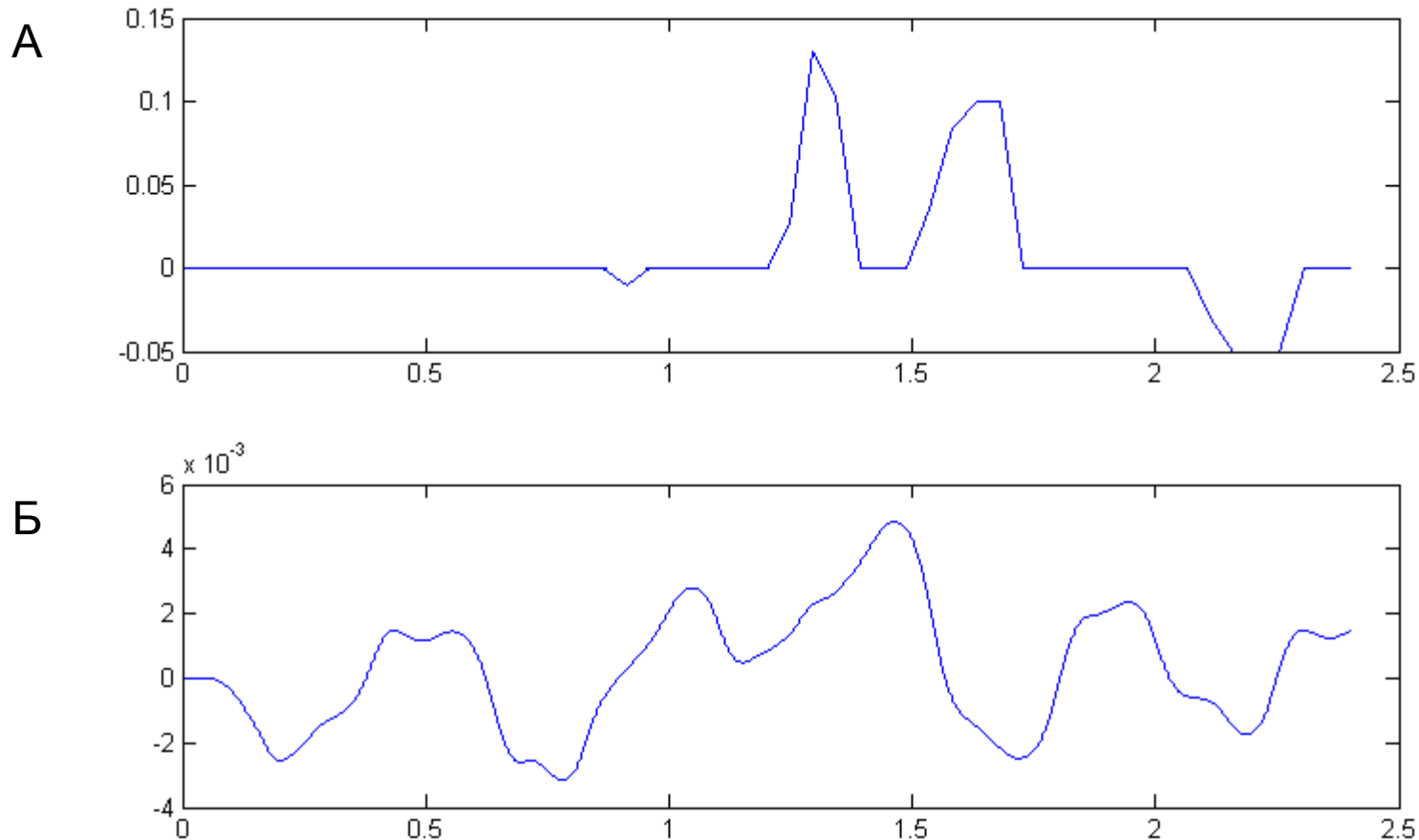
В фазе опоры работают экстензоры. В фазе переноса активируются флексоры [Yakovenko et al., 2004]. Параметры активации подбирались вручную в зависимости от параметров предыдущего шага.

Ось ординат, отн. ед. активации

Ходьба вперед



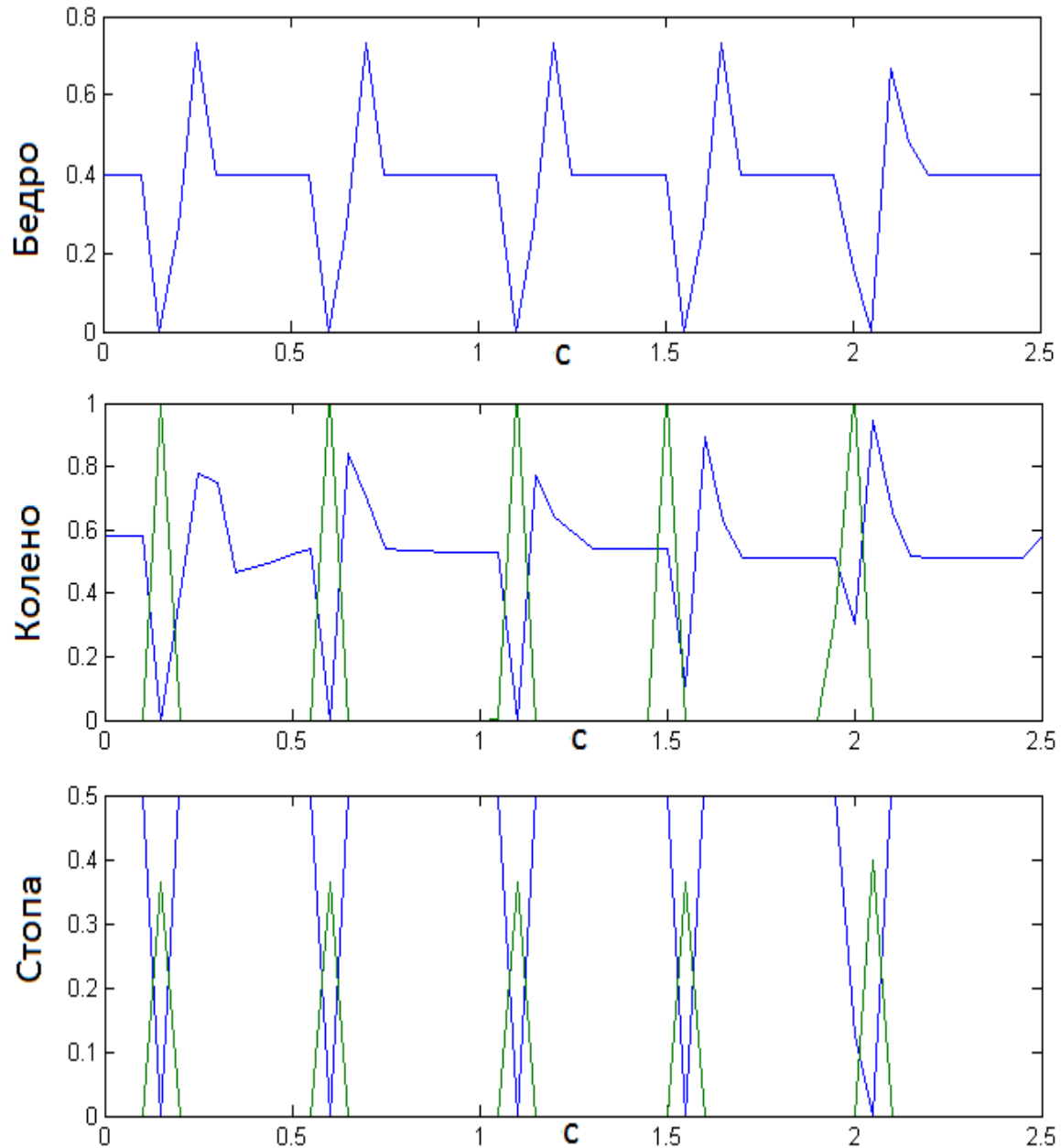
Поддержание равновесия. Ходьба вперед



А) Боковая сила - Ось абсцисс – с, ось ординат – Н.

Б) Отклонения центра тяжести таза в направлении, перпендикулярном плоскости дорожки, от положения покоя. Ось абсцисс – с, ось ординат - м. Отрицательные значения – отклонения влево, положительные – отклонения вправо.

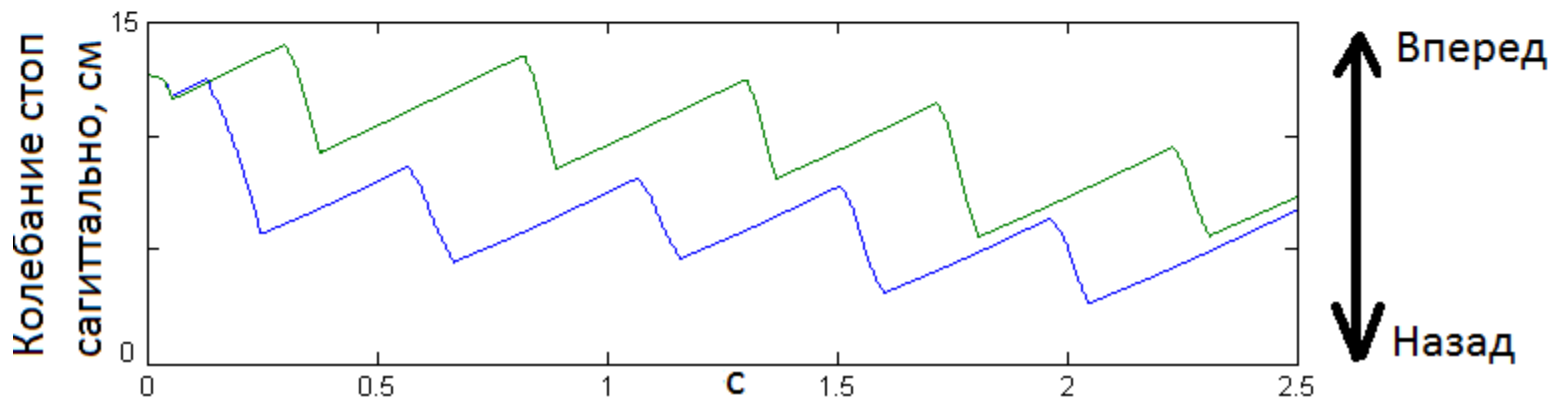
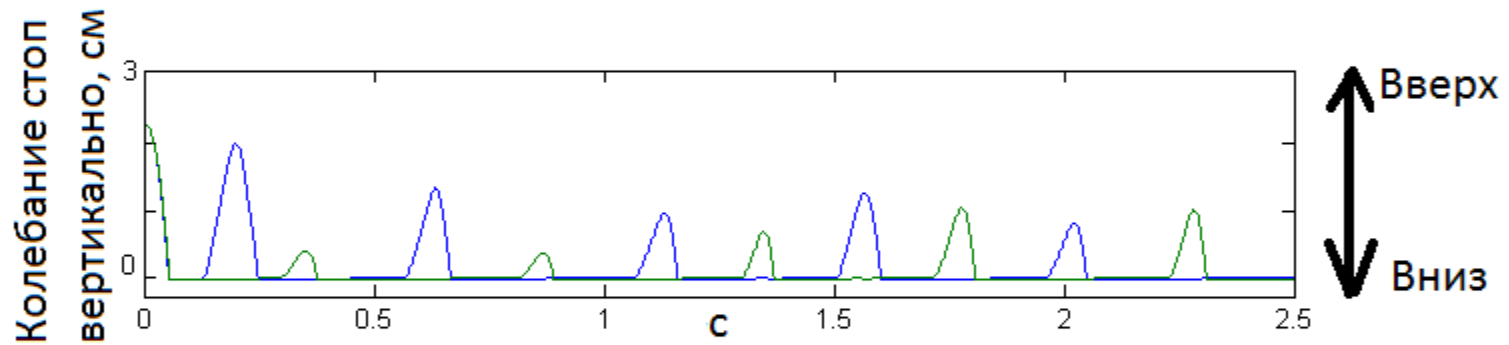
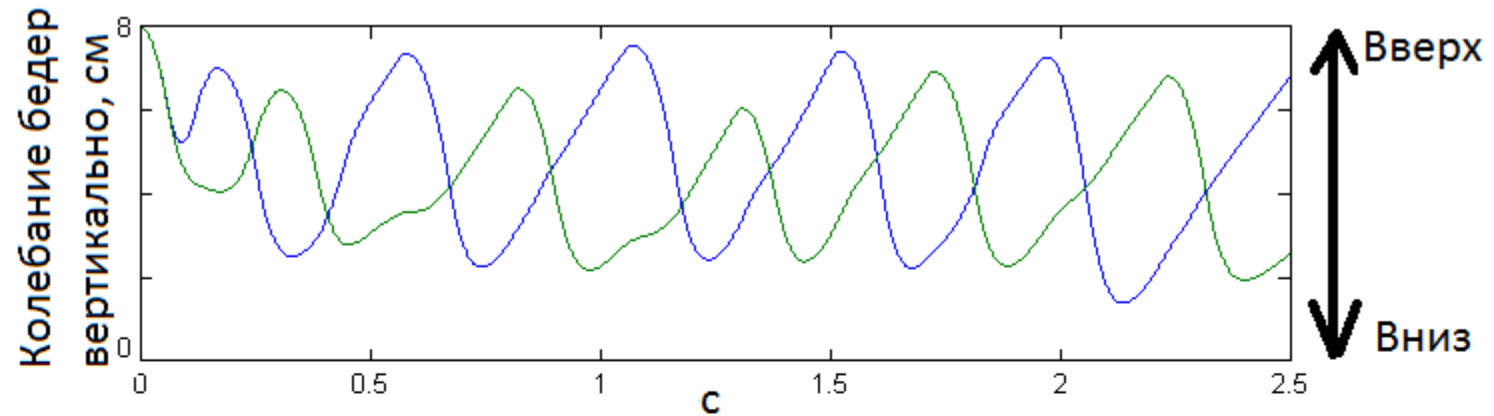
Ходьба назад



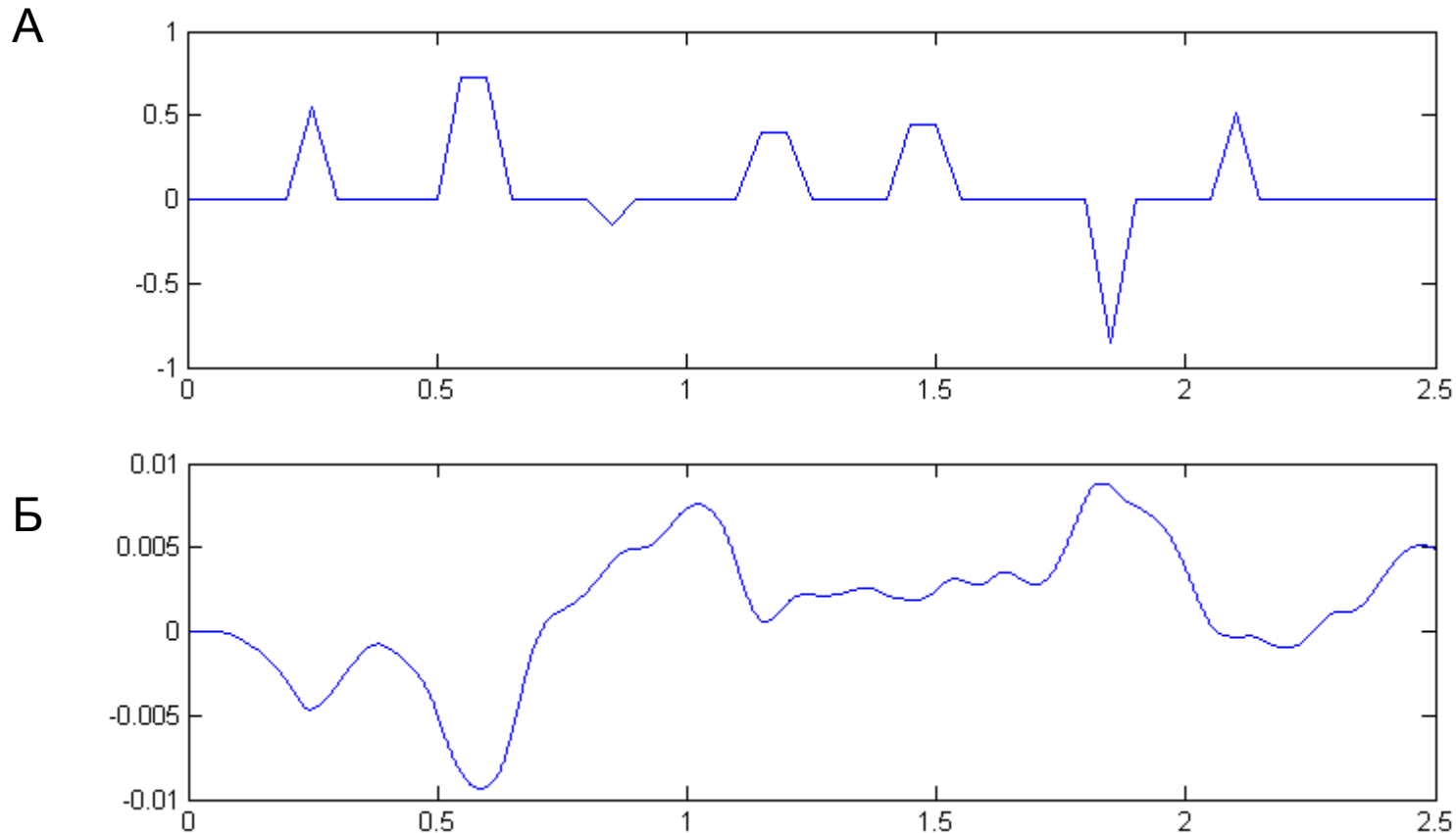
По сравнению с ходьбой кошек вперед для ходьбы назад характерна меньшая активность флексоров бедра (мышца IP, в модели неактивна) и большая активность флексоров голени (мышца BFP в модели, протяженность активации на 9% больше, чем при ходьбе вперед) [Buford, Smith, 1990].

Ось ординат, отн. ед. активации

Ходьба назад



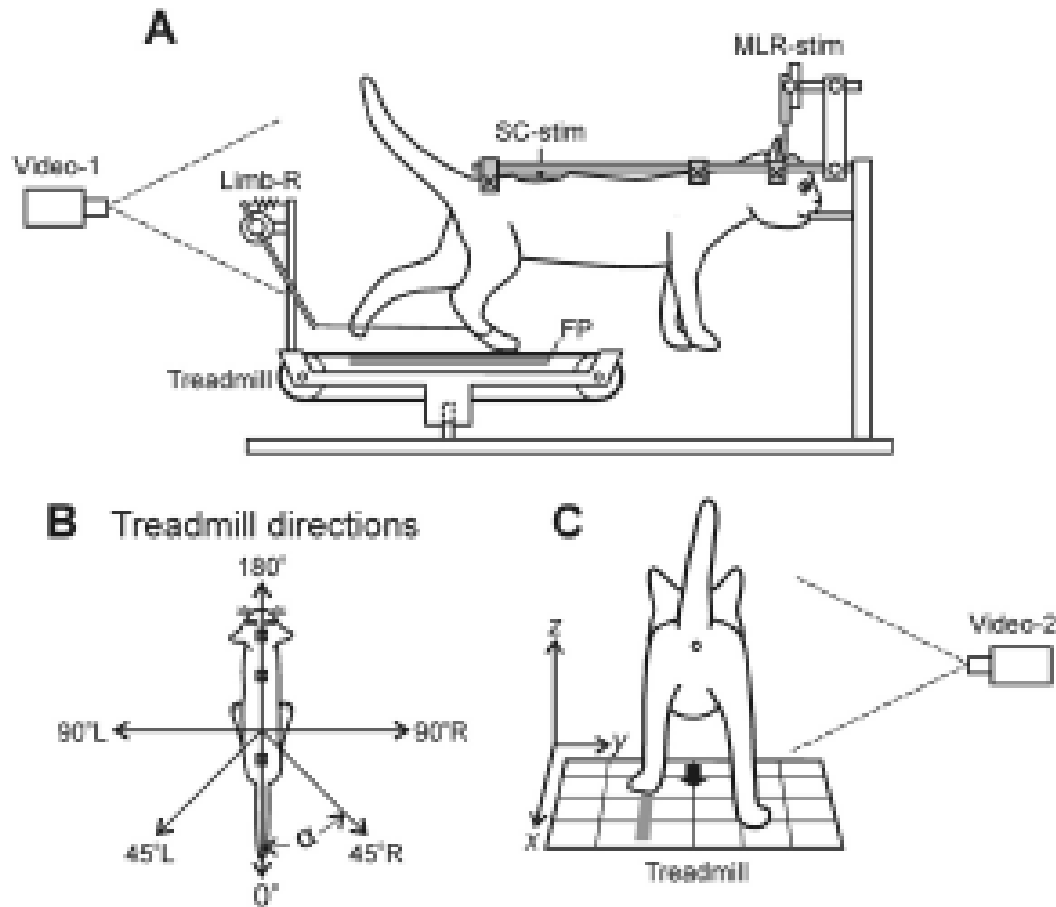
Поддержание равновесия. Ходьба назад



А) Боковая сила - Ось абсцисс – с, ось ординат – Н.

Б) Отклонения центра тяжести таза в направлении, перпендикулярном плоскости дорожки, от положения покоя. Ось абсцисс – с, ось ординат - м. Отрицательные значения – отклонения влево, положительные – отклонения вправо.

Кошки



Голова животного и туловище закреплены, конечности свободно расположены на опорной поверхности. Инициация локомоторной активности осуществлялась эпидуральной стимуляцией сегмента L5 спинного мозга. Брали устойчивые фрагменты записи протяженностью 10-20 шагательных циклов от 3х децеребрированных кошек для ходьбы вперед и назад [Musienko et al., 2012].

Модель vs Кошка.

Ходьба вперед.

	Модель	Кошка
Длина шага, м	0.05±0.01	0.11±0.01
Длительность фазы опоры, с	0.4±0.04	0.56±0.06
Длительность фазы переноса, с	0.06±0.01	0.42±0.04
Корреляция колебаний стоп	-0.46±0.24	-0.88±0.01
Показатель связи Юла (TA vs MG)	-1	-1
Самоподобие миограммы TA	0.55±0.07	0.28±0.16
Самоподобие миограммы MG	0.50±0.03	0.26±0.06

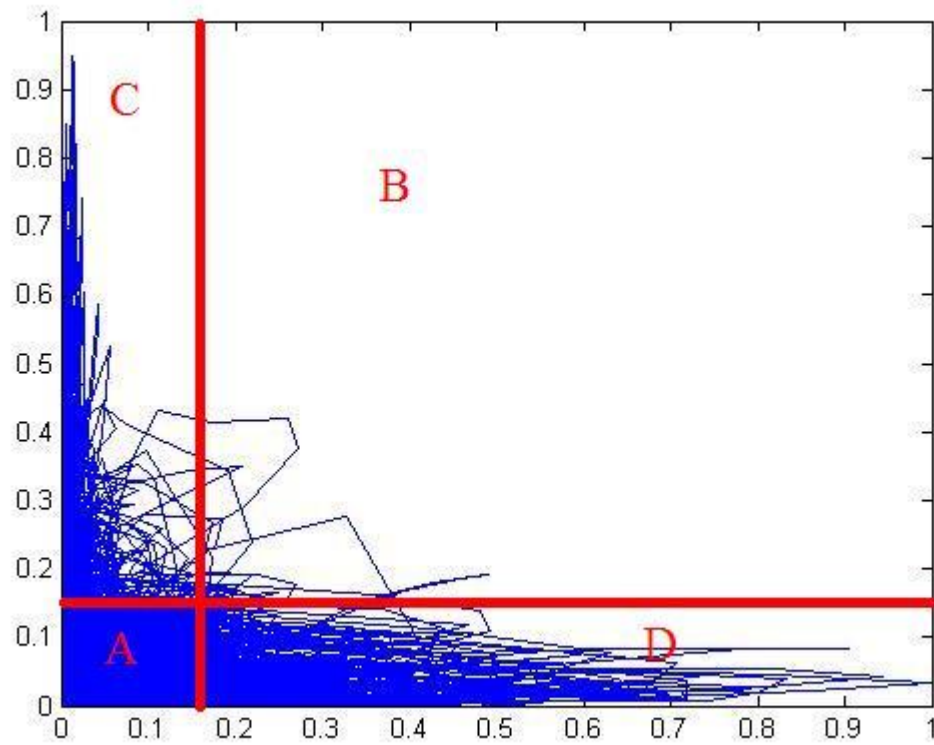
Модель vs Кошка.

Ходьба назад.

	Модель	Кошка
Длина шага, м	0.05±0.01	0.12±0.03
Длительность фазы опоры, с	0.39±0.05	0.64±0.22
Длительность фазы переноса, с	0.08±0.01	0.48±0.16
Корреляция колебаний стоп	-0.42±0.39	-0.63±0.13
Показатель связи Юла (TA vs MG)	-1	-0.44±0.48
Самоподобие миограммы TA	0.53±0.08	0.31±0.16
Самоподобие миограммы MG	0.50±0.02	0.17±0.03

Заключение

- в рамках единой модели за счет вариации управляющих воздействий реализованы два режима локомоции;
- разработанная модель качественно воспроизводит движения лап кошки при ходьбе вперед и назад;
- планируется дальнейшая разработка подсистемы автоматического управления локомоции.



$$Ka = (AB-CD)/(AB+CD)$$