

А. Ю. В у к о л о в, А. А. Г о л о в и н,

Н. В. У м н о в

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОХОДКИ ЛОШАДИ НА АЛЛЮРЕ “ШАГ” МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ ФОТОСЪЕМКИ

Обоснованы преимущества метода стробоскопической фотосъемки при натурном экспериментальном исследовании кинематики походки живой системы. Проведен качественный анализ движения ног лошади на аллюре “шаг” с точки зрения траекторий точек, устойчивости, а также с выделением особенностей отработки траектории движения центра масс всей системы. Выполнен анализ движения копыта при подходе к опорной поверхности. Дана оценка вероятностных составляющих в управлении конечностями живой системы.

E-mail: andrei.vukolov@gmail.com; aalgol@rambler.ru;

Ключевые слова: лошадь, кинематика, походка, вероятность, аллюр, шаг, нагрузка, стробоскоп.

Одним из путей повышения проходимости мобильных роботов при работе на неподготовленной поверхности является переход от колесных или гусеничных движителей к шагающим. Однако управление подобными системами — в значительной мере нетривиальная задача, так как требует не только реализации шагового цикла отдельного движителя (ноги), но и организации последовательности работы всех движителей (выбора походки). Сложность выбора походки связана со значительным их числом и неопределенностью критериев выбора. Существенную помощь может оказать тщательное (в том числе экспериментальное) исследование походок, реализуемых живыми системами.

По этому вопросу накоплен обширный иллюстративный материал, из которого, однако, не удастся понять, по каким признакам животные выбирают ту или иную походку или каким образом они переходят с одной походки на другую, например, при увеличении скорости движения. Алгоритмы живой природы могут оказаться полезными при разработке систем управления движением транспортных роботов с шагающим движителем, поскольку все построенные к настоящему времени шагающие системы имеют, как правило, одну походку, выбранную из условия обеспечения статической устойчивости машины, что обуславливает чрезвычайно низкую скорость перемещения. Увеличение скорости неизбежно приводит к изменению походки и потере статического равновесия на отдельных участках шагового цикла. Животные при таких частично устойчивых походках сохраняют в целом устойчивость ходьбы, хотя описание принципов и алгоритмов перехода с

походки на походку в литературе фактически не приводится. Всестороннего изучения требуют, в частности, вопросы анализа сенсорикой животного неровностей опорной поверхности и учета распределения этих неровностей при выработке сигналов управления конечностями. При этом получить сколько-нибудь значимые результаты подобного исследования можно только в натурном эксперименте, в крайнем случае при специальной постановке опыта с использованием модельной опорной поверхности.

При экспериментальном и натурном исследованиях кинематики биосистем наиболее важными являются отслеживание и анализ траекторий точек избранного объекта. Такое отслеживание позволяет судить об алгоритмах управления, реализуемых системой. При этом для быстро движущихся объектов, в частности лошадей, точность и временное разрешение отслеживания траектории имеют первостепенное значение. Метод, используемый при проведении экспериментального исследования, должен обеспечить высокие значения указанных характеристик при минимально возможном воздействии на объект.

В связи с развитием информационных технологий широкое распространение получили бесконтактные методы исследования с применением электронно-оптических регистрирующих приборов. В настоящее время наиболее применяемыми в исследованиях кинематики биосистем являются следующие методы:

— синхрофотография (современное название Bullet-Time), заключающаяся в установке по пути следования объекта нескольких фоторегистрирующих устройств (камер или шлирен-блоков), объединенных в единую сеть системой синхронизации срабатывания. Метод требует тщательного планирования эксперимента, большого количества оборудования, а его использование в нестудийных условиях затруднительно. Метод отличается высокой точностью захвата положений объекта в отдельных точках траектории, неограниченным пространственным разрешением, но имеет весьма ограниченное временное разрешение (фактически определяемое числом регистрирующих устройств на избранном участке пути следования). Впервые такой метод был применен Э. Майбриджем [1] для исследования общей кинематики походки лошадей;

— видеосъемка, которая обеспечивает чрезвычайно высокое временное разрешение за счет быстрой смены кадров (на современных видеосистемах класса Rapid — до 50 000 кадр./с), не требует большого количества оборудования, однако имеет серьезные ограничения пространственного разрешения из-за особенностей процесса съемки, конструкции устройств и обработки первичного сигнала. При частоте смены кадров более 500 кадр./с метод применяется исключительно в студийных условиях. Методика проведения натурального эксперимента

на механической системе промышленного назначения с применением видеосъемки приведена в работе [2];

— motion capture [3] заключается в закреплении в определенных точках объекта реперных маркеров с последующей регистрацией их смещения специальным оборудованием. Позволяет записывать движения отдельных точек объекта в режиме реального времени. Метод применяется исключительно в студийных условиях, обеспечивает рекордные показатели пространственного разрешения и точности отслеживания формы траектории, однако в исследовательских целях практически не применяется из-за высокой стоимости оборудования, а также закрытости большинства разработок в области обработки результатов по коммерческим соображениям;

— стробоскопическая фотосъемка заключается в повторном экспонировании в регистрирующем устройстве одиночного кадра с фиксацией на нем определенной совокупности положений исследуемого объекта. Эффект повторного экспонирования достигается применением специального осветительного оборудования. Метод имеет достаточно высокое, наперед задаваемое временное разрешение (до 200 Гц), пространственное разрешение ограничено только типом регистрирующего устройства. При этом методе обеспечивается максимальная точность отслеживания траектории движения объекта за счет экспонирования всех исследуемых положений на единый кадр. Студийных условий для проведения эксперимента не требуется.

Для проведения натурных исследований походок лошади на аллюре “шаг” был выбран метод высокоскоростной (40 Гц и более) стробоскопической фотосъемки.

Общие положения. Описание исследуемой походки по существующей системе. Постановка задачи экспериментального исследования. Походка, подлежащая исследованию (аллюр “шаг”), была отобрана из всего ряда походок биосистем как наиболее простая и близкая к воспроизведению механическими и механокибернетическими системами. Лошадь в качестве основного объекта исследования выбрана из-за ее широкого распространения в качестве сельскохозяйственного животного, а также из-за чрезвычайно высокой стабильности реализуемых ею походок. В качестве системы описания походок применена цикловая табличная система, предложенная В.Б. Сухановым [4]. Циклограмма походки на аллюре “шаг”, описанная в этой системе, приведена на рис. 1.

Как следует из рис. 1, а также из анализа работ [5] и [6], простой набор положений ног относительно опорной поверхности не дает полного представления о траекториях движения и скоростях отдельных точек (особенно копыта), а также об обеспечении устойчивости животного на траектории следования. Исходя из указанного, можно

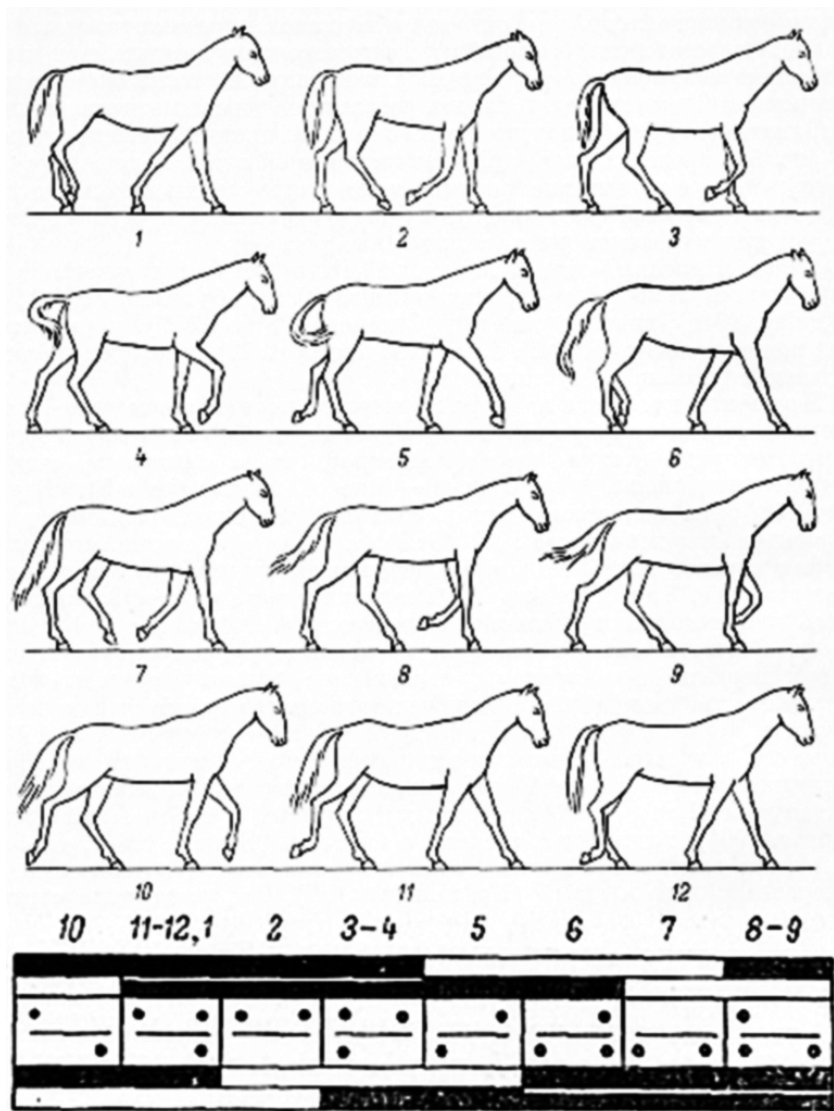


Рис. 1. Циклограмма аллюра “шаг” (по В.Б.Суханову). Цифры отражают индекс положения на рисунках, черные полосы и точки в таблице соответствуют периодам постановки ног на опорную поверхность. Наружные от горизонтальной оси полосы соответствуют задним ногам, внутренние — передним

сформулировать следующие задачи экспериментального исследования походки:

- получить стробоскопические снимки движения ног лошади на аллюре “шаг”;
- провести качественный анализ траектории движения отдельных суставов и частей ног;
- рассмотреть движение ног в привязке к автоматизму походки, обратной связи с рельефом опорной поверхности.

Планирование и проведение натурального эксперимента. Съемка проводилась в крытом тренировочном манеже конно-спортивного участка ВВЦ. Беговая дорожка имела гаревое покрытие с высотой неровностей, соразмерной высоте копыта. В качестве основного регистрирующего устройства применялась фотокамера Canon EOS 400D, оснащенная CCD-сенсором с эквивалентной светочувствительностью 60° DIN (100×ISO). Оптическая система имела переменное фокусное расстояние 18...50 мм с углом охвата до 150°. Стробирование обеспечивал импульсный фотоосветитель Sigma EF-530DGS с эффективной длительностью импульса $2 \cdot 10^{-4}$ с, частотой срабатывания до 100 Гц и длиной пачки до 64 импульсов. Камера размещалась на расстоянии 0,4...0,7 м от края беговой дорожки манежа на прямолинейном участке. Положение оптической оси устанавливалось параллельно опорной поверхности, перпендикулярно траектории следования лошади. Для облегчения анализа траекторий по снимкам на передних ногах лошади были помещены предохранительные щитки светло-серого цвета. Фотоосветитель устанавливался непосредственно на корпусе фотокамеры и излучал направленный пучок света с угловым рассеянием по горизонтали 25°...100°, по вертикали — 10°...45°. Выдержка экспозиции кадра на фотокамере привязывалась к суммарной длине пачки стробирующих импульсов. Синхронизация начала экспозиции выполнялась вручную. Из-за сильной загрязненности дорожки съемка проводилась без применения светопоглощающего фона.

Обработка полученных кадров сводилась к повышению контраста и приведению баланса желтого цвета к нулевой отметке.

Во время проведения эксперимента съемка осуществлялась в середине одного из тренировочных пробегов, после предварительной разминки в течение 5–7 мин, что позволяло добиться высокой воспроизводимости походки.

Автоматизированные измерения или аналитический расчет полученных стробоскопических снимков не предусматривался. В связи с этим стало возможным не принимать во внимание различные факторы, вносящие малозначимые (с качественной точки зрения) погрешности в получаемые изображения, в частности ошибки синхронизации, шумы сенсора и слабые геометрические искажения.

Вопросы обратной связи и автоматизма походки. При изучении обратной связи ноги, имеющей сенсорную связь с опорной поверхностью на аллюре “шаг”, использовали фотографию (рис. 2) с прорисованными траекториями перемещения суставов.

Основное внимание при анализе фотоснимка предполагалось уделять передним ногам, так как опыт работы специалистов-биологов конно-спортивного участка ВВЦ с лошадьми в реальных условиях свидетельствует, что именно передние ноги являются основным элементом, влияющим на отработку траектории движения центра масс



Рис. 2. Стробоскопический фотоснимок аллюра “шаг” с прорисованными траекториями перемещения суставов и конца копыта; длина пачки 6 импульсов, частота срабатывания 30 Гц

системы. Участие задних ног в процессе выполнения аллюра “шаг”, согласно опытным свидетельствам, весьма ограничено. Фактически задние ноги обеспечивают только передачу на опорную поверхность основных нагрузок от сил тяжести и движущих сил, а также отработку мгновенного равновесного положения всей системы, с периодическим чередованием двух- и трехопорных стадий (см. рис. 1).

Зафиксированный на снимке момент соответствует фазе, предшествующей переносу нагрузки с одной опорной передней ноги на другую (позиции 10–11, см. рис. 1). Как следует из рис. 2, траектории движения плечевого (локтевого) и коленного суставов передней ноги — практически прямолинейны. Одновременно при выполнении единичного шага придается сложное движение копыту, так что траектория движения конца копыта имеет форму с радиусом кривизны, монотонно увеличивающимся по мере приближения к опорной поверхности. Такое движение обеспечивает плавное касание копытом опорной поверхности при подходе к точке постановки. Вторая же передняя нога при выполнении этого шага работает как жесткая конструкция, имеющая

амортизирующий элемент в зоне верха копыта [7]. Описанная работа копыта хорошо видна на траектории, показанной на рис. 3. Колено при переносе нагрузки за счет структуры ноги (выноса точки постановки копыта вперед по направлению движения относительно продолжения осевой линии ноги) работает подобно упругому элементу.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что на аллюре “шаг” при выполнении переноса нагрузки передняя нога, не находящаяся в контакте с опорной поверхностью, работает как пороговый датчик, обеспечивая в момент касания быстрый (за время не более $1/15$ полной продолжительности шагового цикла) переход в положение, позволяющее принять массу тела без значительного напряжения мускулатуры (полное выпрямление ноги с установкой путового сустава в положение 180^{+3°). Таким образом, происходит плавный (с демпфированием) перенос нагрузки от силы тяжести тела на следующую переднюю опорную ногу, что позволяет избежать ударов при повторении шагового цикла. Один из этапов переноса нагрузки демонстрирует рис. 3, на котором приведены положения элементов ног, ограниченных упру-



Рис. 3. Стробоскопический фотоснимок аллюра “шаг” с прорисованными положениями элементов ноги при переносе нагрузки; длина пачки 4 импульса, частота срабатывания 25 Гц

гими связями. Фотоснимок на рис. 3 соответствует позициям 11–12 циклограммы (см. рис. 1), в отображаемый момент уже выполняется непосредственный перенос нагрузки между опорными передними ногами.

Поперечное управление передними ногами на аллюре “шаг” сильно зависит от характера опорной поверхности. Опыт работы с лошадьми свидетельствует, что точка постановки копыта передней ноги рассчитывается нервной системой животного с учетом вероятного характера распределения неровностей опорной поверхности по пути следования, а также влияния этого распределения на вероятное смещение центра масс системы относительно статически устойчивого положения. Для задних же ног точка постановки копыта на следующем шаге рассчитывается с учетом текущей длины шага и регулированием общего темпа походки (что обеспечивает, в частности, изменение темпа при преодолении переступанием протяженных препятствий). При этом конечная вероятность потери системой устойчивости (сбоя походки или падения) не достигает 1 %, а время расчета следующей точки постановки копыта составляет, по имеющимся опытным оценкам, не более 1/10 общей продолжительности шагового цикла. Изучение механизмов расчета вероятностей и влияния их на управление конечностями при реализации походки — актуальные задачи для дальнейших исследований.

Выводы. 1. Использование стробоскопической фотосъемки в качестве основной методики натурного эксперимента позволяет без применения значительного количества специального оборудования и вне студийных условий быстро получать в большом объеме данные об исследуемых траекториях.

2. При рассчитанных точках постановки копыт мгновенное силовое равновесное состояние системы отрабатывается задними ногами практически без участия передних.

3. Основное управление движением центра масс системы реализуется передними ногами за счет иной структуры и более гибкого управления движением элементов.

4. Учет распределения неровностей опорной поверхности обеспечивается наличием вероятностной составляющей в управлении конечностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. En. W i k i p e d i a . o r g. Wikipedia English Edward Muybridge [электронный ресурс] (http://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge). Published under GNU Public License.
2. V u k o l o v A., K h a r i t o n o v E. Kinematical analysis of mechanical systems by results of digital video recording // Proceedings of the 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines SYROM 2009 / Edited by Ion Visa. – Springer. – 2009. – P. 457–464.

3. R u . W i k i p e d i a . o r g . Wikipedia Russian Motion Capture [электронный ресурс] (http://ru.wikipedia.org/wiki/Motion_capture). Published under GNU Public License.
4. С у х а н о в В. Б. Общая система симметричной локомоции наземных позвоночных и особенности передвижения низших тетрапод. – Л.: Наука, 1986.
5. Б р е м А. Э. Жизнь животных. Т. I. Млекопитающие. – М., 1939.
6. H i l d e b r a n d M. Motions of the running cheetah and horse // J. Mammal. 1959. – No. 40. – P. 481–495.

Статья поступила в редакцию 19.01.2010

Андрей Юрьевич Вуколов родился в 1984 г., в 2007 г. окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант, ассистент кафедры “Теория механизмов и машин” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области бесконтактных измерений, кинематики биосистем, инженерной педагогики, мультимедийных обучающих систем.

A.Yu. Vukolov (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate, assistant lecturer of “Theory of Mechanisms and Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of contactless measurements, kinematics of bio-systems, engineering pedagogics, multimedia training systems.

Александр Александрович Головин родился в 1939 г., в 1962 г. окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теория механизмов и машин” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области процессов и машин обработки давлением, кинематики и динамики машин, пресового оборудования, экспериментальной механики.

A.A. Golovin (b. 1939) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1962. D. Sc. (Eng.), professor of “Theory of Mechanisms and Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of processes and machines for noncutting shaping, kinematics and dynamics of machines, press equipment, experimental mechanics.

Николай Владимирович Умнов (1936–2010), в 1959 г. окончил Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теория механизмов и машин” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий лабораторией динамики машин Института машиноведения РАН им. А.А. Благонравова. Автор более 70 научных работ в области динамики машин, шагающих систем, теории управления, алгоритмизации и программирования информационных подсистем робототехнических устройств.

N.V. Umnov (1936–2010) graduated from the Ural Polytechnic Institute n.a. S.M. Kirov in 1959. D. Sc. (Eng.), professor of “Theory of Mechanisms and Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of laboratory of dynamics of machines of the Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 70 publications in the field of dynamics of machines, walking systems, control theory, algorithmization and programming of information subsystems of robototechnic devices.