

Вопросы планирования походки при проектировании четырехногих шагающих систем на примере реализации лошадью аллюра «умеренная рысь»

11, ноябрь 2010

автор: Вуколов А. Ю.

УДК 531.8

НПС 01.02.00

МГТУ им. Н.Э. Баумана
Andrei.vukolov@gmail.com

1. Введение.

Мобильная робототехника промышленного назначения, в частности, транспортные и подъемные системы, при работе в сложных условиях окружающей среды, нуждается в существенном повышении рельефной проходимости [4, 7]. Одним из способов ее повышения является переход от колесных и гусеничных движителей к шагающим. Шагающее шасси позволяет, при прочих равных условиях, обеспечить высокую гибкость и маневренность системы, максимальную приспособляемость к изменяемой конфигурации рабочей зоны, возможность работы в стесненном пространстве без изменения несущей способности. Однако управление подобными системами является в значительной мере нетривиальной задачей, так как требует не только реализации настраиваемого шагового цикла отдельного движителя (ноги), но и организации последовательности работы всех движителей (выбора походки). Выбор походки обуславливает быстрдействие системы, что особенно важно для транспортной робототехники [4, 10].

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. Кроме того, как правило, подобные машины – шестиногие, хотя маневренность шестиногих систем при ограниченном быстродействии приводов может быть существенно ниже, чем у четырехногих [3, 5]. Увеличение скорости движения неизбежно приводит к изменению походки и потере статического равновесия на отдельных участках шагового цикла, так как быстродействие ног в целом ограничено [8, 11]. Животные при таких *частично устойчивых* походках сохраняют в целом устойчивость ходьбы [5], хотя описание принципов и алгоритмов перехода с походки на походку в литературе фактически не приводится. Существенную помощь может оказать тщательное (в том числе экспериментальное) исследование походок, реализуемых живыми системами. Такие исследования неоднократно проводились различными исследователями и организациями, накоплен обширный иллюстративный материал [3, 14, 15], из которого, однако, не удается понять, по каким признакам животные выбирают ту или иную походку, или каким образом происходит переход с одной походки на другую, например, при увеличении скорости движения. В связи с этим возникает необходимость в дополнительных экспериментальных исследованиях походок живых систем в натуральных условиях.

2. Общие положения. Постановка задачи экспериментального исследования.

Походка, подлежащая исследованию (аллюр «умеренная рысь»), была отобрана из всего ряда походок биосистем как достаточно скоростная, и при этом простая в реализации. Лошадь в качестве основного объекта исследования выбрана по причине ее широкого распространения в качестве сельскохозяйственного животного, а также чрезвычайно высокой стабильности реализуемых ею походок [3, 14]. В качестве системы описания походок применена широко известная и применяемая цикловая табличная система, предложенная В.Б. Сухановым [2]. Циклограмма походки на аллюре «умеренная рысь», описанная в этой системе, представлена на рис. 1.

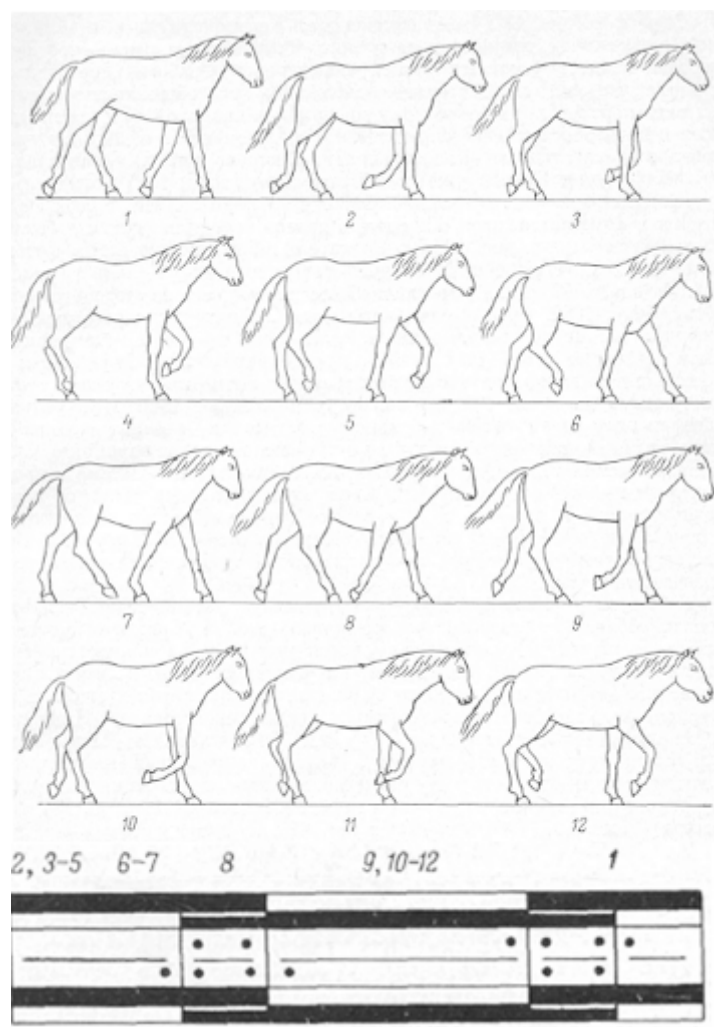


Рис. 1. Циклограмма аллюра «умеренная рысь» (по В.Б. Суханову).

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.

Как видно из рис. 1, работ [3, 5, 13], простой набор положений ног относительно опорной поверхности не дает полного представления о траекториях движения отдельных точек, а также об обеспечении устойчивости животного на траектории следования. Исходя из вышесказанного, можно сформулировать задачи экспериментального исследования походки:

1. Получить стробоскопические снимки движения ног лошади на аллюре «умеренная рысь»;
2. Провести качественный анализ траектории движения отдельных суставов и частей ног;

3. Рассмотреть движение ног в привязке к автоматизму походки, обратной связи с рельефом опорной поверхности;

3. Планирование и проведение натурального эксперимента.

При экспериментальном и натурном исследовании кинематики биосистем наиболее важным является отслеживание траекторий точек избранного объекта. При этом для быстродвижущихся объектов (в частности, лошадей), а также при исследовании кинематики изменения походки – точность и временное разрешение отслеживания траектории имеют первостепенное значение. Метод, используемый при проведении 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 частности, фото- и видеокамер, стробоскопов [1, 12]. Для проведения натуральных исследований походок лошади на аллюре «умеренная рысь» был выбран метод высокоскоростной (40 Гц и более) стробоскопической фотосъемки. Суть метода 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 (фотостробоскопов направленного действия). Метод имеет достаточно высокое, наперед задаваемое временное разрешение (до 200 Гц), пространственное разрешение ограничено только типом регистрирующего устройства. Обеспечивается максимальная точность отслеживания траектории движения объекта за счет экспонирования всех высвеченных положений на единый кадр. Основное преимущество, повлиявшее на выбор метода при проведении данного исследования, заключено в том, что не требуется

студийных условий (специализированного фонового цветового канала и дополнительного освещения) для проведения эксперимента.

Съемка производилась в крытом тренировочном манеже конноспортивного 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 (100x 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 – ручная. По причине сильной загрязненности дорожки съемка производилась без применения светопоглощающего фона.

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

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

Автоматизированные измерения или аналитический обсчет 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.

4. Вопросы обратной связи и автоматизма походки.

При выполнении аллюра «умеренная рысь» наблюдается чередование двух- и четырехопорных стадий (см. рис. 1). Для анализа движения элементов передней ноги применялся фотоснимок (рис. 2) с прорисованными траекториями движения опорной части копыта и предплечевой части. Основное внимание при анализе предполагалось уделять передним ногам, так как опыт работы с лошадьми в реальных условиях свидетельствует, что именно передние ноги являются основным элементом, влияющим на отработку траектории движения центра масс системы. Запечатленный на снимке момент соответствует позициям 12-1 по рис. 1 (фаза, предшествующая переносу нагрузки с одной опорной передней ноги на другую).



Рис. 2. Стробоскопический фотоснимок аллюра «умеренная рысь» при касании передней ногой опорной поверхности, с прорисованными положениями опорной плоскости копыта и траекториями перемещения концов предплечевой части.

Длина пачки – 8 импульсов, частота срабатывания – 60 Гц.

Как видно из рис. 2, траектория подхода передней ноги к опоре имеет достаточно очевидные отличительные признаки:

1. Касание опорной поверхности происходит в положении, когда плоскость копыта практически параллельна ей. Инерционное торможение при разгибании путового сустава минимизирует скорость копыта при касании;

2. Траектория движения нижней части предплечья – почти прямолинейна, наклонена под небольшим углом к опорной поверхности;
3. Траектория движения верхней части предплечья – также практически прямолинейна, но угол подхода к опорной поверхности существенно больше;
4. Вторая передняя нога при выполнении данного элемента шагового цикла – работает как жесткая конструкция, имеющая амортизирующий элемент в зоне верха копыта [1, 13].

Согласно работам [1, 2], ненагруженная передняя нога в процессе выполнения походки работает в качестве активного порогового датчика, обеспечивая плавный (с демпфированием) перенос нагрузки от силы тяжести тела на следующую переднюю опорную ногу. Однако повышение скорости движения центра масс системы приводит к необходимости повышения быстродействия ноги (снижению времени перевода в положение готовности к переносу нагрузки) с одновременным предохранением от непредвиденных столкновений с препятствиями. Возникает необходимость гашения более значительных инерционных усилий (большем запасе по вязкостно-упругой деформации ноги). Этим объясняются различия в траекториях движения элементов ноги при подходе к опоре на аллюрах с разной скоростью движения. В частности, как описано в работе [1], при выполнении аллюра «шаг» (скорость существенно ниже) траектории движения плечевого (локтевого) и коленного суставов – почти параллельны опорной поверхности, копыто же движется по криволинейной траектории. Постановка же копыта при касании параллельно опоре на аллюре «умеренная рысь» – предохраняет от спотыкания при столкновении рогового венца копыта с высоким препятствием.

Точка постановки копыта передней ноги рассчитывается нервной системой животного с учетом вероятного влияния распределения неровностей опорной поверхности на вероятное смещение центра масс системы относительно статически устойчивого положения [1]. Поперечное управление при этом играет второстепенную роль.

Участие задних ног в процессе выполнения походки, согласно свидетельствам специалистов, весьма ограничено. Фактически, задние ноги обеспечивают только передачу на опорную поверхность импульса движущей силы, а также отработку мгновенного равновесного положения всей системы. Точка постановки копыта задней ноги на следующем шаге – рассчитывается с учетом текущей длины шагового цикла, регулируя общий темп походки (что обеспечивает регулирование длины шага в широких пределах на любом аллюре, и уверенное преодоление различных протяженных препятствий). В подтверждение выводов работы [1], наличие предиктивной составляющей в управлении конечностями лошади можно считать очевидным.



Рис. 3. Стробоскопический фотоснимок аллюра «умеренная рысь» в фазе изменения опорности (поз. 10 по рис. 1).

Длина пачки – 4 импульса, частота срабатывания – 40 Гц.

Изучение циклограмм аллюров «шаг» (см. работы [1, 2]) и «умеренная рысь» (см. рис. 1) – позволяет сделать важный вывод об устойчивости центра масс системы, а именно: аллюр «умеренная рысь», при более высокой скорости движения центра масс системы,

является *более устойчивым* режимом, чем аллюр «шаг». Объясняется это различием в опорности. На аллюре «шаг» имеются двухопорные стадии, где опора осуществляется на переднюю и заднюю ноги с одной стороны. Такое состояние системы является крайне неустойчивым в поперечном направлении. Компенсация неустойчивости обеспечивается задней ногой, быстро (протяженность неустойчивой стадии не более $1/10 - 1/15$ времени цикла) переводящей систему в трехопорную стадию. В случае же аллюра «умеренная рысь» двухопорная стадия всегда является диагональной (рис. 1, 3), что придает системе повышенную устойчивость к сваливанию в поперечном направлении. Кроме того, переход к описанной стадии идет из четырехопорного статически устойчивого положения. Переход из двух- к четырехопорной стадии на аллюре «умеренная рысь» оказывается механически более плавным (см. рис 3). Таким образом, при выполнении аллюра «умеренная рысь» система оказывается весьма устойчивой в поперечном направлении [11], при этом наличие четырехопорной стадии исключает накопление ошибки, ведущее к непредсказуемому смещению вектора скорости центра масс. Сваливание же вбок в диагональной двухопорной стадии почти исключается за счет значительного движущего импульса, выдаваемого задней ногой [10]. Из вышесказанного следует, что повышение устойчивости движения лошади при повышении скорости движения центра масс является закономерным и биологически обусловленным.

5. Перспективы дальнейших исследований

Изучение механизмов просчета вероятного распределения препятствий и влияния их на управление конечностями при реализации походки – является актуальной задачей для дальнейших исследований. Введение сходных предиктивных методов в управление шагающими машинами позволит кардинально улучшить их адаптацию к условиям природного рельефа, повысить плавность хода и быстродействие управления. Кроме того, во всестороннем анализе нуждается факт повышения устойчивости биосистем при увеличении

скорости движения. Использование принципов изменения опорности, используемых животными, открывает путь к разработке скоростных транспортных роботов и шагающих шасси с изменяемой походкой [6, 8, 9] – при известном быстродействии приводов конечностей.

6. Общие выводы

1. Алгоритмы, реализуемые живыми системами, в частности регулирование опорности на рысистой походке, являются применимыми для конструирования шагающих транспортных роботов нового поколения – с изменяемой походкой.
2. Использование стробоскопической фотосъемки в качестве основной методики натурального эксперимента позволяет без применения большого количества специального оборудования и вне студийных условий быстро получать в большом объеме как качественные, так и количественные данные об исследуемых траекториях.
3. Учет распределения неровностей опорной поверхности обеспечивается на любом аллюре наличием вероятностной (предиктивной) составляющей в управлении конечностями. Учет вероятностных аспектов управления ногами животных позволяет создавать новые алгоритмы для систем управления шагающими машинами.
4. Повышение быстродействия обратной связи системы с опорной поверхностью при увеличении скорости движения центра масс – обеспечивается изменением траекторий движения элементов передней ноги, как основного информационного элемента выполнения походки. Использование подобной схемы применимо для организации процесса оптимизации очувствления конечностей шагающих машин.

Список литературы

1. Вуколов А.Ю., Головин А.А., Умнов Н.В. Исследование кинематики походки лошади на аллюре «шаг» методом высокоскоростной стробоскопической фотосъемки. Вестник МГТУ, серия «Машиностроение», 2010, в печати.
2. Суханов В.Б. Общая система симметричной локомоции наземных позвоночных и особенности передвижения низших тетрапод. Л., изд-во «Наука», Ленинградское отд., 1986.
3. Брем А. Э. Жизнь животных, т. I. Млекопитающие. М., 1939
4. Фролова Н.Е. О тягово-цепных свойствах и профильной проходимости шагающих машин с цикловыми движителями. Вестник Астраханского государственного технического университета. 2006. № 4. с. 310-316.
5. Hildebrand M. 1960. How animals ran. Scient. Amer., 202, 5: с. 148—157.
6. Lewis M.A., Bekey G.A. Gait Adaptation in a Quadruped Robot. Autonomous Robots. 2002. Т. 12. № 3. с. 301-312.
7. Zhou D., Low K.H., Zielinska T. An efficient foot-force distribution algorithm for quadruped walking robots. Robotica. 2000. Т. 18. № 4. с. 403-413.
8. Аустен Я., Формальский А.М., Шевальеро К. Виртуальный четырёхногий робот: конструкция, управление, моделирование, эксперименты. Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. № 8. с. 1-28.
9. Muraro A., Chevallereau C., Aoustin Y. Optimal Trajectories for a Quadruped Robot with Trot, Amble and Curvet Gaits for Two Energetic Criteria. Multibody System Dynamics. 2003. Т. 9. № 1. с. 39-62.
10. Ringrose R.P. Self-stabilizing running. Dissertation Abstracts International. 1998. Т. 58. № 4. 1980.

11. *Kurazume R., Yoneda K., Hirose Sh.* Feedforward and Feedback Dynamic Trot Gait Control for Quadruped Walking Vehicle. *Autonomous Robots*. 2002. T. 12. № 2. с. 157-172.
12. *Vukolov A., Kharitonov E.* Kinematical Analysis of Mechanical Systems by Results of Digital Video Recording. *Proceeding of SYROM'2009 Conference*.
13. *Swanevelter A.G.* An optical gait analysis system for horses. *Masters Abstracts International*. 1995. T. 33. № 2. C. 0581.
14. *Geddes L.A.* Gaits of Horses: Marey's Studies. *Science*. 1966. T. 151. № 3707. C. 152a-152.
15. *Miles W.R.* Muybridge animal pictures. *Science*. 1929. T. 70. № 1809. C. 216a-217.