С.Н. Саяпин

Симбиозный самоперемещающийся массажный робот как носимая система мониторинга и принятия решений

Аннотация

Представлена новая концепция симбиозного самоперемещающегося массажного робота «Триангель», представляющая его механическое соединение с телом пациента и с единой системой координат. Подобный симбиоз массажного робота с пациентом позволяет осуществлять скользящий баночный массаж спины или грудной клетки не только в пассивном положении тела, но и при перемещениях пациента. Показана возможность применения «Триангеля» в качестве носимой системы мониторинга и принятия решений в экстремальных ситуациях. Приведены примеры основных типов возможных падений пациента с «Триангелем» на поверхность и алгоритмы принятия решений «Триангелем» как автономно, так и под дистанционным управлением массажиста в режиме реального времени через Интернет, направленные на снижение риска возникновения угрозы здоровью или жизни пациента после падения на поверхность во время массажа.

Введение

Известно, что в настоящее время массаж считается одним из наиболее эффективных немедикаментозных методов профилактики заболеваний, лечения, реабилитации и снятия усталости. Поэтому массаж применяется повсеместно в клиниках, больницах, медицинских центрах, а также в домашних условиях. Все виды массажа выполняются массажистом или пациентом (самомассаж) вручную или при помощи массажных аппаратов. Для усиления эффекта традиционных мануальных приемов массажист может использовать скользящий баночный массаж (СБМ) спины и грудной клетки [1].

Для роботизации СБМ в ИМАШ РАН разработан симбиозный самоперемещающийся массажный робот (ССМР) «Триангель» [2]-[4]. «Триангель» – это плоский робот параллельной структуры с 3 степенями свободы, построенный на основе самоперемещающегося многофункционального вакуумного массажера в виде активного треугольного модуля параллельной структуры [2], [3] с учетом нового симбиозного подхода [4], заключающегося в его механическом дискретном объединении с телом пациента. В результате тело пациента становится несущим элементом самого «Триангеля» и массаж может выполняться независимо от пространственного положения тела, а также при перемещении пациента в помещении. Однако если массаж выполняется во время ходьбы, то пациент может упасть, например споткнувшись, поскользнувшись или в результате потери сознания. Одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы является интеллектуализация ССМР «Триангель». Поэтому важно разработать применительно к нему алгоритмы принятия решений (АПР) в случае падения пациента на поверхность во время СБМ. Ниже представлены описание ССМР «Триангель», основные возможные типы падения пациента на поверхность во время СБМ, а также АПР «Триангелем» после падения пациента на поверхность.

Цель работы – разработка эффективных алгоритмов принятия решений симбиозным самоперемещающимся массажным роботом «Триангель» после падения пациента на поверхность.

Описание ССМР «Триангель» и основные типы возможных падений пациента во время СБМ

Описание ССМР «Триангель»

Суть симбиотического подхода к созданию ССМР «Триангель» для СБМ заключается в его объединении с телом пациента и единой системой координат и обеспечении независимого функционирования «Триангеля» и пациента во время СБМ. Благодаря симбиотическому подходу, пациент во время СБМ может ходить, выполнять рутинную и другую работу, а также удовлетворять свои физиологические потребности.

Структурная схема «Триангеля» (а), схема установки «Триангеля» на спину и массажные движения при СБМ (б), а также пример вертикального СБМ спины полноразмерным пневматическим прототипом ССМР «Триангель» при обнаженном торсе (в) и под футболкой (г) показаны на *рис. 1*. «Триангель» (*рис. 1а*) содержит массажное устройство в виде активного треугольного модуля АВС, состоящего из трех одинаковых стержней, концы которых шарнирно соединены с массажными вакуумными банками (МВБ) 1.

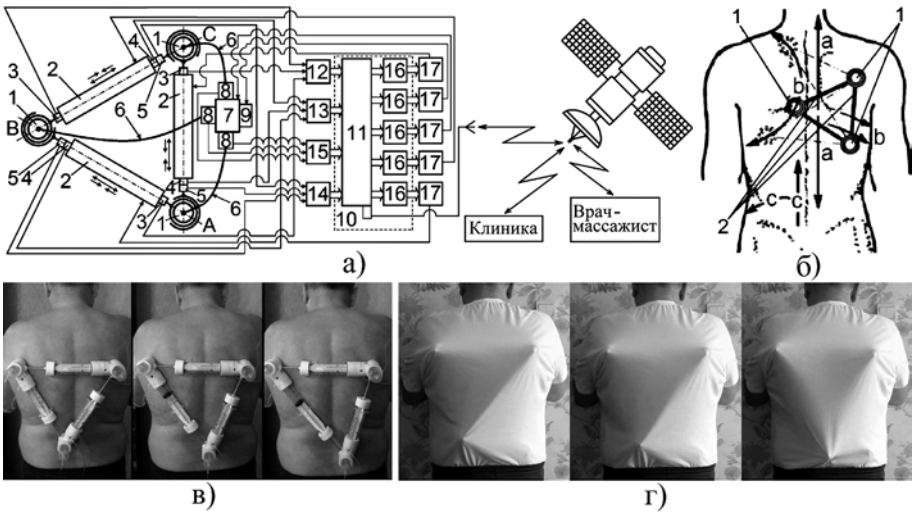

Рис. 1. Структурная схема «Триангеля» (а), схема установки «Триангеля» на спине и массажные движения при СБМ (б), вертикальный СБМ спины при помощи полноразмерного пневматического прототипа ССМР «Триангель» при обнаженном торсе (в) и под футболкой (г) (пояснения в тексте)

Активная треугольная стержневая параллельная структура «Триангель» с 3DOF обеспечивает геометрическую неизменяемость формы и работу стержней только на растяжение/сжатие и, как следствие, высокую жесткость и низкий удельный вес. Каждый из стержней модуля АВС снабжен линейным приводом (ЛП) 2 с датчиками силы (ДС) 3, относительного перемещения (ДОП) 4 и относительной скорости (ДОС) 5. Все МВБ 1 герметично соединены гибкими шлангами 6 с соответствующими каналами воздухораспределителя (ВР) 7. ВР 7 снабжен датчиками давления (ДД) 8 и вакуумным насосом (ВН) 9, которые электрически соединены с системой управления (СУ) 10 в виде нейрокомпьютера 11 с аналого-цифровыми и цифроаналоговыми преобразователями (АЦП и ЦАП). Входы системы управления 10 через шину данных АЦП соединены с выходами АЦП 12, 13, 14, 15 ДС 3, ДОП 4, ДОС 5 и ДД 8 соответственно. Выходы СУ 10 через выходные шины данных ЦАП 16 соединены с входами усилителей мощности 17 и ЛП 2, ВР 7 и ВН 9. СУ 10 обеспечивает мониторинг и управление в режиме реального времени. «Триангель» имеет миниатюрные трехосные гироскопы-акселерометры (на *рис. 1* не показаны), которые устанавливаются в вершинах модуля АВС. Также «Триангель» имеет двустороннюю громкоговорящую связь с пациентом, а также беспроводную связь с наручными устройствами для измерения пульса, артериального давления, аритмии, температуры и др. (на *рис. 1* не показаны).

Пациент устанавливает модуль АВС на подготовленную поверхность своего тела и фиксирует его вакуумированием МВБ 1 (*рис. 1б*). После закрепления модуля АВС на теле пациента образуется симбиоз пациент-«Триангель», симбионты которого могут продолжать функционировать независимо друг от друга. Симбиоз пациент-«Триангель» сохраняется независимо от движений пациента и его пространственной ориентации. Давление в МВБ 1 регулируется при помощи ВР 7, ДД 8 и ВН 9 по командам от СУ 10 таким образом, что две МВБ 1 закреплены на спине пациента герметично неподвижно, а третья МВБ 1 – герметично подвижно. Далее в СУ 10 вводятся индивидуальные данные пациента, которые включают в себя контуры массируемых частей тела, связанные с основной системой координат симбиоза, координаты частей тела, не допускающих СБМ, и координаты центров двух герметично неподвижных МВБ 1. Схема установки ССМР «Триангель» на спину и траектории движений герметично подвижной МВБ 1 при различных заболеваниях показаны на *рис. 1б*: a – остеохондроз позвоночника и люмбаго; b – пневмония и бронхит; c – миозит и пояснично-крестцовый радикулит [1], [2]-[4]. Геометрическая неизменяемость модуля АВС позволяет определять координаты его вершин и управлять их перемещениями путем измерения длин всех стержней при помощи ДОП 4. Все МВБ 1 в процессе СБМ попеременно становятся герметично подвижными и неподвижными.

Для определения кинематических и динамических параметров ССМР «Триангель» в ИМАШ РАН был изготовлен и испытан его полноразмерный пневматический прототип в виде треугольного параллельного механизма с 3 степенями свободы (*рис. 1в*, *г*), выполненный на основе одноразовых трехкомпонентных шприцев объемом 60 мл [4]. Шприцы использовались в качестве пневматических линейных приводов и вакуумных насосов, а футляры для шприцев – в качестве МВБ. В качестве соединительных гибких шлангов использовались эластичные трубки с роликовыми зажимами от стандартных инфузионных систем. В ходе испытаний пневматического прототипа робота «Триангель» был осуществлен СБМ, включающий отсос воздуха из МВБ и вертикальное перемещение пневматического прототипа робота «Триангель» вдоль массируемого участка спины (*рис. 1с*). При помощи пневматического прототипа робота «Триангель» была продемонстрирована реальная возможность проведения СБМ в вертикальном положении пациента как при обнаженном торсе (*рис. 1в*), так и под футболкой (*рис. 1г*). При этом ЛП и ВН пневматического прототипа ССМР «Триангель» управлялись вручную. Фото- и видеосъемка СБМ проведены цифровой камерой «Canon IXUS 990 IS» («Canon», Япония).

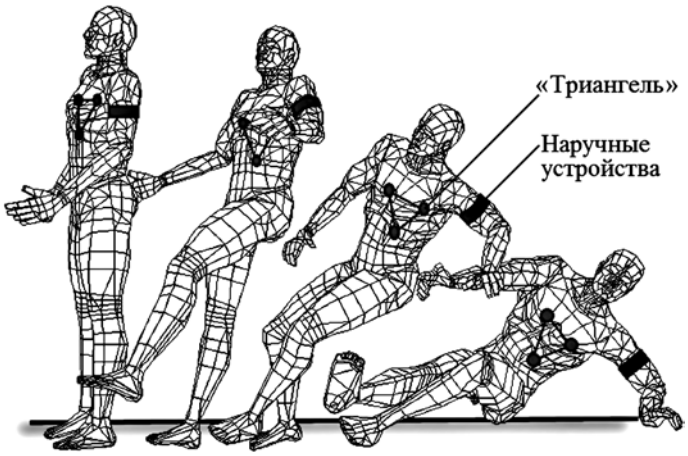

Рис. 3. Компьютерная схема скоординированного движения назад (пояснения в тексте)

Основные типы возможного падения пациента при его перемещениях в процессе проведения СБМ

В процессе проведения автономного массажа спины или грудной клетки роботом «Триангель» может произойти падение пациента в результате нарушения равновесия тела из положения стоя или при ходьбе по неровной или скользкой поверхности, а также при заболеваниях костей и суставов нижних конечностей или при нервно-сосудистых нарушениях, сопровождающихся потерей сознания. Классификация основных типов падений на поверхность представлена на *рис. 2а*. В зависимости от того, как пациент падает (лицом вниз или на бок) и положения рук в момент удара, у него могут быть следующие травмы: ссадины, гематомы и раны в местах соприкосновения, переломы ключицы, плечевой кости, локтевого отростка, костей предплечья, костей голени, остистых отростков позвонков, ребер и др. [5]-[7].

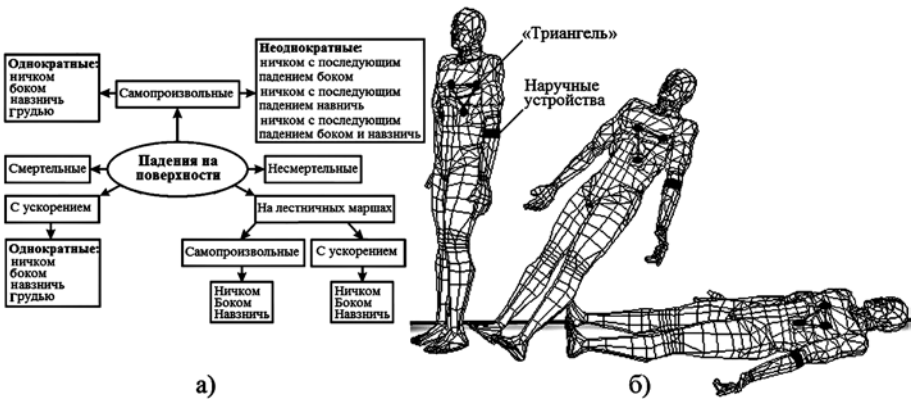

Рис. 2. Классификация основных типов падений (а) и компьютерная схема нескоординированного движения назад (б) (пояснения в тексте)

В случае нескоординированного движения назад тело достигает максимального уровня скорости вращения и повышается степень травматичности. При этом удар туловища о поверхность происходит сначала затылком, лопатками, поясницей, ягодицами, а затем верхними и нижними конечностями (*рис. 2б*) [6]. В случае скоординированного движения назад тело группируется, как показано на *рис. 3*, и степень травматизма снижается [6].

Основные типы возможных падений пациента на лестнице

Наиболее травматичным является нескоординированное падение тела пациента из положения стоя, так как при этом развивается максимальная угловая скорость в области головы (*рис. 4*). В пассивном нескоординированном падении навзничь (*рис. 4а*) местами удара являются затылок, лопатки, поясница и ягодицы, а также нижние и верхние конечности. В случае нескоординированного падения лицом вниз (*рис. 4б*) травмы локализуются преимущественно на передней поверхности верхней части тела. При падении с нижних ступеней происходит соударение с плоской поверхностью лестницы (*рис. 4в*). При падении со средних ступеней туловище изгибается по контуру угла, образованного лестницей и ее плоской поверхностью (*рис. 4г*). При падении с верхних ступеней тело ударяется о наклонную ребристую поверхность лестницы и затем сползает по ней вниз (*рис. 4д*).

При пассивном нескоординированном падении из положения стоя на бок (*рис. 5а*) после потери равновесия тело пациента наклоняется вниз с нарастающим ускорением и ударяется о ступеньки боковой поверхностью туловища, плечом и наконец головой. После этого тело подпрыгивает и движется вниз с поворотом на спину или на живот с последующим повторным ударом и остановкой движения.

ССМР «Триангель» представляет собой дискретное механическое соединение с массируемым участком тела пациента. Благодаря этому движения массируемого участка тела совпадают с пространственным переносным движением самого робота. В результате по данным миниатюрных блоков трехосных гироскопов-акселерометров, которые установлены в вершинах «Триангеля» и наручных устройствах на предплечье (на *рис. 1* не показаны), можно судить о траекториях движений и ускорениях частей тела, по которым, после сравнения с модельными диаграммами, изображенными на *рис. 2б-5а* можно судить о характере падений и состоянии пациента. Такие данные позволяют ССМР «Триангель» принимать решения, наиболее благоприятные и безопасные для пациента после его падения. Ниже представлены АПР ССМР «Триангель», реализуемые после падения пациента на поверхность.

АПР ССМР «Триангель», реализуемые после падения пациента на поверхность

ССМР «Триангель» позволяет пациенту перемещаться в помещении в процессе проведения автономного массажа спины или груди. При этом, с одной стороны, пациент получает дополнительный комфорт, а с другой стороны, возникает опасность его падения на поверхность в случае хождения внутри помещения с одновременным проведением массажа. Поэтому разработка эффективных АПР для своевременного реагирования ССМР «Триангель» в случае падения пациента является актуальным направлением в интеллектуальной робототехнике. В настоящее время разработано большое количество АПР применительно к самым разнообразным сферам деятельности человека [8]-[14]. Однако нет такого алгоритма, который мог бы применяться всегда, вне зависимости от того, с какой именно проблемой пришлось столкнуться роботу, что ее вызвало, какие факторы оказывают на нее влияние, управляемы ли они и т. д. Рассмотрим, каким должен быть первый этап АПР применительно к ССМР роботу «Триангель» в случае падения пациента на поверхность в процессе проведения массажа спины или груди.

АПР ССМР «Триангель» обеспечивается его СУ 10 (*рис. 1а*) при помощи установленных программ, моделирующих различные типы и виды падений человека на поверхность (*рис. 2б*), подобных программам, описанным в [5]-[7]. Также перед процедурой СБМ в СУ 10 (*рис. 1а*) дополнительно вводят данные о весе и росте пациента. Исходя из глобальной цели и с учетом эффекта фрейминга [14] разработан следующий АПР ССМР «Триангель» после падения пациента на поверхность (*рис. 5б*), который включает в себя три блока подобно алгоритму, описанному в [13].

1-й блок АПР включает в себя этапы «анализ ситуации» и «постановка цели». При этом этап «анализ ситуации» включает в себя две операции: идентификацию проблемы, сбор и анализ необходимой информации. В нашем случае этап «постановка цели» сводится к глобальной цели при принятии решений ССМР «Триангель», характеризуемой снижением негативных последствий от возможного падения пациента на поверхность.

Идентификация проблемы включает в себя следующие действия ССМР «Триангель».

1. Установление и регистрация факта падения пациента на поверхность, характеризуемое ускоренным движением его тела вниз. Регистрация факта падения осуществляется СУ 10 «Триангеля» (*рис. 1а*) по показаниям от гироскопов-акселерометров, установленных в вершинах «Триангеля» и наручных устройствах (на *рис. 1* не показаны).

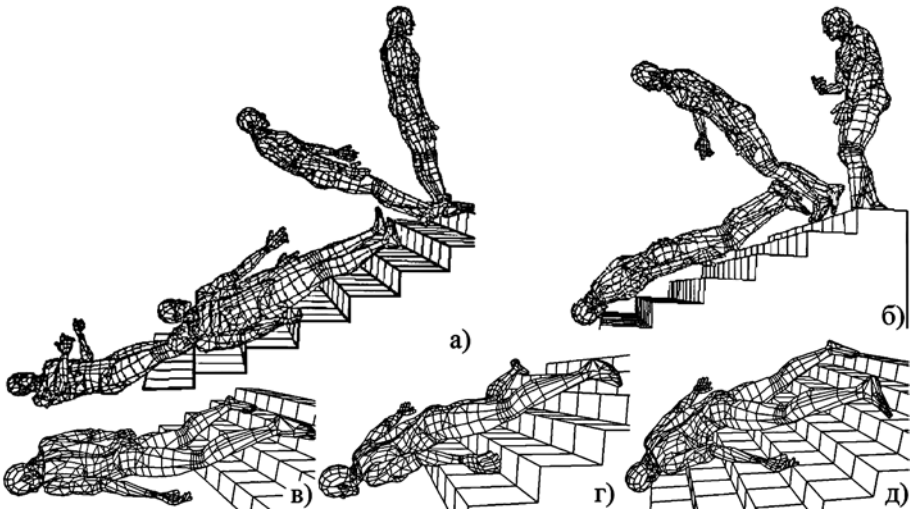

Рис. 4. Компьютерные схемы основных типов падений пациента на лестнице («Триангель» и наручные устройства не показаны): нескоординированное падение навзничь (а); нескоординированное падение лицом вниз (б); нескоординированное падение лицом вниз с нижних (в), средних (г) и верхних ступеней (д) (пояснения в тексте)

2. СБМ прекращается, и все МВБ 1 (*рис. 1*) делаются неподвижными.

3. Установление типа падения (*рис. 2б – 5а*) и его вида. Здесь по показаниям гироскопов-акселерометров осуществляется построение траектории движения туловища и руки пациента, ее сравнение с модельными движениями тела при падении человека, описанными в [6]-[8], и установление типа и вида падения.

4. Установление места падения пациента при помощи спутниковой системы навигации типа GPS или ГЛОНАСС.

Сбор и анализ необходимой информации включает в себя определение пульса, давления, частоты дыхания и температуры тела пациента и на их основе, с учетом типа и вида падения, характеризующих возможные повреждения и травмы пациента, формирование оценки состояния пациента после его падения.

2-й блок АПР включает в себя этапы «разработка альтернатив», «разработка критериев отбора» и «выбор альтернативы». Для повышения эффективности принятия решения роботом «Триангель» альтернативные решения сформированы с учетом состояния пациента для следующих случаев: «пациент в сознании и не нуждается в помощи», «пациент в сознании и нуждается в помощи», «пациент без сознания» и «пациент умер».

3-й блок АПР включает в себя этапы «реализация выбранной альтернативы» и «контроль и оценка ресурсов». На этапе реализации происходит внедрение в действие выбранной альтернативы. Параллельно этапу «реализация выбранной альтернативы» идет этап «контроль и оценка ресурсов».

Ниже приведены отобранные альтернативы и соответствующие им действия.

Выбор альтернативы «пациент в сознании и не нуждается в помощи» осуществляется в результате следующих действий. Если пациент находится в лечебном учреждении, то данные о факте падения и самостоятельного вставания, типе и виде падения с возможными травматическими последствиями, а также данные о пульсе, давлении, температуре и частоте дыхания передаются на дежурный пост и врачу-массажисту. Далее, через спутниковую речевую связь с пациентом, ему предлагают помощь. В случае отказа от помощи врач-массажист принимает решение о продолжении или прекращении процедуры СБМ в соответствии с установленным для него регламентом.

В случае запроса пациентом помощи выбирается альтернатива «пациент в сознании и нуждается в помощи» и осуществляются следующие действия. Через GPS или ГЛОНАСС на дежурный пост лечебного учреждения дополнительно поступают координаты местоположения и направляются соответствующие специалисты для оказания пациенту необходимой помощи. Если СБМ выполнялся пациентом в домашних условиях, то указанная выше информация через спутниковую связь поступает в службу спасения и врачу-массажисту. Также по громкоговорящей спутниковой связи и данным о пульсе, давлении, температуре и частоте дыхания пациента контролируют его состояние и дают устные рекомендации ему и окружающим людям (если они присутствуют) о необходимых действиях до прихода врача или приезда скорой помощи.

Выбор альтернативы «пациент без сознания» осуществляется в случае нескоординированного вида падения, отсутствия последующих движений тела и при наличии дыхания и пульса. Если пациент находится в лечебном учреждении, то данные о факте падения, типе и виде падения с возможными травматическими последствиями, а также данные о пульсе, давлении, температуре и частоте дыхания передаются на дежурный пост и врачу-массажисту. Далее через спутниковую речевую связь делаются попытки установления голосового контакта с пациентом. В случае, если пациент пришел в сознание, ему предлагают помощь и в зависимости от ответа выбирается одна из предыдущих альтернатив. Если пациент не приходит в сознание, то осуществляют действия согласно альтернативе «пациент в сознании и нуждается в помощи». При этом непрерывно контролируются данные о пульсе, давлении, температуре и частоте дыхания пациента. В случае нахождения пациента в домашних условиях и отсутствия кого-либо из окружения врач-массажист может через дистанционное управление ССМР «Триангель» осуществить попытку приведения пациента в сознание за счет потряхивания спины или груди пациента путем организации возвратно-поступательных перемещений МВБ 1 с соответствующим вибрационным воздействием на кожу и мышцы спины или груди пациента. В случае полного исчезновения пульса, давления и дыхания без последующего их возобновления в течение установленного времени, а также при отсутствии каких-либо движений тела, осуществляют действия согласно альтернативе «пациент умер». При этом дополнительно поступает сообщение о факте смерти в полицию с координатами местонахождения пациента.

Выбор альтернативы «пациент умер» может быть осуществлен после любого из типов и видов падения в случае полного исчезновения пульса, давления и дыхания без последующего их возобновления в течение установленного времени и при отсутствии каких-либо движений тела. При этом действия осуществляют подобно действиям, описанным выше.

Заключение

Установлена возможность пешего перемещения пациента внутри помещения в процессе проведения СБМ его спины или груди автономным ССМР «Триангель», что повышает комфортность условий для пациента.

Выявлена возможность падения пациента на поверхность при пешем перемещении в помещении в процессе проведения СБМ, а также типы и виды падений.

Установлены возможные последствия после падения пациента в процессе проведения СБМ в зависимости от типа и вида падения.

Способность принятия своевременных решений как в одиночку, так и во взаимодействии с оператором-лидером позволяет ССМР «Триангель» снизить негативные последствия от падения пациента на поверхность.

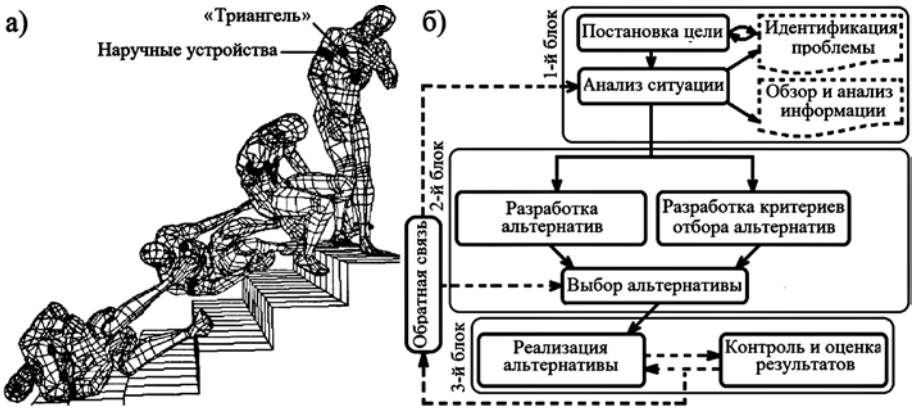

Рис. 5. Компьютерная схема пассивного нескоординированного падения тела пациента с «Триангелем» и наручными устройствами на бок из положения стоя (а) и блок-схема АПР ССМР «Триангель» с оператором лидером (пояснения в тексте)

Список литературы:

1. *Дубровский В.И., Дубровская А.В.* Лечебный массаж. – М.: ИД «Гэотар-Мед», 2004. 501 с.
2. *Саяпин С.Н., Саяпина М.С.* Перемещающийся массажер и способ осуществления массажа с его помощью / Патент РФ № 2551939. 2015. Патентообладатель: ФГБУН ИМАШ РАН.
3. *Саяпин С.Н., Саяпина М.С.* Самоперемещающийся многофункциональный вакуумный массажер на базе активного треугольного модуля параллельной структуры // Медицинская техника. 2017. № 2 (302). С. 52-55.
4. *Саяпин С.Н.* Анализ и перспективы применения автономного симбиозного самоперемещающегося массажного робота «Триангель» на борту пилотируемой космической станции // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. № 54 (1). С. 75-78.
5. *Авдеев А.И.* Травма на лестничном марше: биомеханика, диагностика, морфология (установление событий и обстоятельств происшествия). Дальневост. гос. мед. ун-т. – Хабаровск: Хабар. краев. центр псих. здоровья, 2001. 97 с.
6. *Зарубина С.В.* Судебно-медицинская оценка повреждений, возникающих при падении на плоскости, и его биомеханические аспекты / Дис. на соиск. уч. степени канд. мед. наук. – Барнаул: ГОУВПО «Алтайский государственный медицинский университет», 2007. 159 с.
7. Руководство по судебной медицине / Под ред. В.Н. Крюкова, И.В. Буромского. – М.: Норма: ИНФРА-М, 2015. 656 с.
8. *Никано Э.* Введение в робототехнику / Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. 334 с.
9. *Брахман Т.Р.* Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. 288 с.
10. *Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н.* Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 296 с.
11. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений. (Серия: «Экономико-математическая библиотека») / Пер. с англ. под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. 352 с.
12. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Пер. с англ.; под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
13. *Хлынов С.А.* Алгоритм принятия управленческих решений в посреднической организации // Экономика, Статистика и Информатика. 2014. № 3. С. 97-100.
14. *Сокол А.Ф., Шурупова Р.В.* Эффект фрейминга и его влияние на принятие решений в медицине (по концепции Д. Канемана и А. Тверски) // Медицинский совет. 2017. № 6. С. 166-168.

Сергей Николаевич Саяпин,
д-р техн. наук, гл. научный сотрудник,
отдел «Вибрационная биомеханика»,
ФГБУН «Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова» РАН,
г. Москва,
e-mail: S.Sayapin@rambler.ru

С.А. Вагнер, А.В. Горина, А.Н. Коновалов, Ф.В. Гребенев, Д.В. Телышев

Моделирование гемодинамики в гигантской церебральной аневризме

Аннотация

Представлены результаты численного моделирования динамики течения крови в гигантской аневризме развилки базилярной артерии. Проведен детальный анализ структуры течения в куполе аневризмы. Показано, что внутри аневризмы формируется незатухающая струя, которая при взаимодействии со стенками аневризмы формирует зону повышенных сдвиговых напряжений. Исследована эволюция вихревого течения на протяжении одного кардиального цикла. Картинка течения существенно изменяется от симметричного вихревого течения до развитой неустойчивости.

Введение

Церебральная, или интракраниальная аневризма представляет собой патологическое местное расширение стенки артерии головного мозга [1]. Данная патология опасна тем, что разрыв аневризмы приводит к тяжелому внутримозговому кровоизлиянию, вызывая серьезные неврологические расстройства вследствие повреждений тканей головного мозга или смерть в большинстве случаев [2]. Часть больных, кто переживает острый период кровоизлияния, подвержены рискам повторного разрыва. Единственный способ избежать возможного повторного разрыва аневризмы – это хирургическое вмешательство. Однако данная процедура также представляет определенные риски осложнений для пациента, среди которых интраоперационный разрыв аневризмы, повреждение артериальных и венозных сосудов, нарушение мозгового кровообращения по ишемическому типу, а также инфекционные осложнения [3]-[5]. Принимая во внимание, что далеко не все аневризмы приводят к разрыву, возникает важная задача выявления факторов-предикторов риска разрыва церебральных аневризм. Эта задача решается путем анализа поведения большого количества аневризм и выявления статистически значимых критериев [6], [7]. На сегодняшний день предложено несколько способов классификации аневризм [8]. Аневризмы различают по величине: миллиарные (диаметром до 3 мм), обычного размера (4…15 мм), большие (16…25 мм), гигантские (более 25 мм); по форме: мешотчатые и фузиформные; по месту расположения: на передней мозговой – передней соединительной артериях, на внутренней сонной артерии (ВСА), на средней мозговой артерии (СМА), на артериях вертебро-базилярной системы. В ряде исследований показано, что наиболее опасными считаются большие и гигантские аневризмы [9], расположенные на ВСА и СМА [10], [11]. Тем не менее клинический опыт показал, что этих критериев недостаточно для выявления склонных к разрыву аневризм и снижения количества кровоизлияний. В связи с этим широкое распространение получили методики, основанные на математическом моделировании гемодинамики внутри аневризмы [12]. В частности, выявлено, что формирование незатухающей струи и сложной структуры течения с более чем двумя вихрями указывает на существенный риск разрыва аневризмы [13]-[15]. С другой стороны, показано, что формирование переходных неустойчивых течений также крайне негативно влияет на стенки аневризм и с высокой вероятностью приводит к разрыву [16], [17]. Одним из наиболее важных количественных гемодинамических параметров является вектор сдвиговых напряжений на стенках аневризмы (Wall Shear Stress, WSS). Распределение сдвиговых напряжений на стенках купола аневризмы связано со структурой течения крови и может также использоваться в качестве критерия прогнозирования увеличения размера и разрыва аневризмы. При этом как слишком высокие значения WSS, так и слишком малые значения могут вызывать деструктивное ре-