

УДК 539.3; 612.76

**ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ
И БИМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С ТАКТИЛЬНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ**

© 2011 г.

*И.Г. Горячева¹, Ю.Г. Мартыненко²*¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва²НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

goryache@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Обсуждаются фундаментальные проблемы создания искусственных тактильных механорецепторов (ИТМ), предназначенных для осязания робототехнических и биомехатронных систем. Рассматриваются задачи диагностики патологических состояний мягких биологических тканей. Предлагаются подходы к обработке информации в видеотактильных датчиках, основанные на методах механики контактных взаимодействий. Анализируется задача определения формы твердого тела в результате его осязания. Проводится обзор перспективных исследований биомехатронных систем с тактильным осязанием (экзоскелетов, управляемых протезов). Составной частью этих исследований является разработка биомеханических моделей искусственных суставов, анализ контактных взаимодействий внутри суставов и формоизменения поверхностей суставных элементов при трении. Результаты выполненных аналитических и численных исследований сравниваются с экспериментальными данными, полученными для конкретных робототехнических и биомехатронных систем.

Ключевые слова: диагностика, контактные взаимодействия, аналитические и численные исследования, экспериментальные данные, робототехнические и биомехатронные системы

Функционирование любого робота сопровождается его контактным взаимодействием с окружающими объектами, поэтому выполнение манипуляций с предметами, управление движением роботов без учета такого взаимодействия, как правило, приводит к невозможности полноценного решения поставленных задач. Из этого следует, что тактильное осязание, наряду с системами технического зрения, становится неотъемлемой частью современных робототехнических систем. Вместе с тем, разработка тактильных сенсоров и соответствующего программного обеспечения отстает от существующих в настоящее время потребностей.

Постановки задач тактильного осязания возникают при конструировании захватных устройств манипуляторов, управлении ходьбой шагающих аппаратов, создании медицинских приборов, в протезировании, роботизированной хирургии [1]. Тактильные датчики используются также для исследования структуры и свойств поверхности.

Содержательные постановки задач количественной диагностики состояния мягких биологических тканей с применением ИТМ требуют выбора модели контактного взаимодействия и идентификации ее параметров. Сложность опре-

деления параметров зависит от типа входной информации, определяемой качеством измерительной аппаратуры, и условий выполнения экспериментов (*in vivo*, *in vitro* или *ex vivo*).

В зависимости от имеющихся данных возникают задачи идентификации двух типов. При постановках задач идентификации в широком смысле модель напряженно-деформированного состояния ткани, контактирующей с чувствительным элементом механорецептора, считается неизвестной, т.е. подлежит выбору и обоснованию. В задачах идентификации, поставленных в узком смысле, такая модель задается заранее, и задача сводится к исследованию обратных задач смешанного типа, объединяющих коэффициентные и геометрические обратные задачи механики деформируемого твердого тела. Коэффициентные задачи используются, когда по данным измерений требуется определить параметры используемой математической модели (модуль Юнга $E = E(\mathbf{x})$ для модели несжимаемой среды Гука, значения коэффициентов $C_{ijk} = C_{ijk}(\mathbf{x})$ для модели Муни – Ривлина, функции сдвиговой и объемной релаксации для вязкоупругой модели и т.д.). Постановка геометрических задач требуется при отыскании границ имеющихся в ткани неоднородностей.

При решении задач идентификации требует-

ся исследование корректности возникающих обратных задач в пределах реализуемой точности измерений. Если обратная задача является некорректной, то для ее решения необходимо применение методов регуляризации, обеспечивающих устойчивость используемых вычислительных алгоритмов, в том числе алгоритмов обработки экспериментальной информации. В экспериментах, выполняемых *in vitro* или *ex vivo*, обычно существует полная информация о перемещениях чувствительного элемента механорецептора и о контактом давлении на поверхности пальпируемой ткани. При проведении экспериментов *in vivo*, в частности при лапароскопических операциях и эндоскопических обследованиях, ситуация осложняется, так как информация о пространственном положении механорецептора может быть ограничена или отсутствовать. При известном распределении напряжений на поверхности сплошной среды и отсутствии информации о поле перемещений ее точек параметры модели этой среды оказываются ненаблюдаемыми.

В качестве возможных путей решения указанной проблемы наблюдаемости параметров модели возможно использование специальных захватных устройств, которые одновременно измеряют и напряжения, и деформации, возникающие при исследовании биологических тканей во время лапароскопических операций (такой подход был недавно предложен в [2]). Другой подход к определению свойств мягких биологических тканей связан с разработкой видеотактильного сенсора, который состоит из видеокамеры, фокусирующихся линз и полусферической головки, изготовленной из прозрачного силикона (PDMS) [3–5]. Видеокамера позволяет определить размеры области контакта головки сенсора с мягкой биологической тканью.

Для определения оптимальной геометрии и механических характеристик головки сенсора были рассмотрены различные варианты конструкции головки, для которых методом конечных элементов был проведен анализ контактного взаимодействия между головкой и тканью. Решена задача о контакте чувствительного элемента (головки сенсора) с несжимаемым упругим полупространством под действием заданной нагрузки. Для сплошного индентора с использованием теории Герца получена аналитическая оценка перемещений точек на поверхности полушара. Для полусферической оболочки задача решалась с использованием программного пакета ANSYS в осесимметричной постановке. Дана оценка горизонтальной составляющей вектора перемещений внешнего контура головки сенсора, поскольку данная

компонента может являться определяющей при снятии показаний видеотактильного сенсора. После калибровки получена эмпирическая формула для оценки жесткости мягкой ткани. Подход опробован на измерении модуля Юнга *in vitro* свиной печени. Результаты исследований показали, что видеотактильный сенсор имеет достаточную чувствительность для того, чтобы отличить здоровую ткань от патологической. Результаты моделирования позволяют оценить возможность использования сенсорного метода для определения свойств различных биологических тканей.

При определении формы тела с помощью осязания требуется анализ зависимости контактных сил в точках соприкосновения тела с тактильными датчиками. При этом возникают обобщения классической задачи теоретической механики о качении тел, соприкасающихся с поверхностью – задача о движении твердого тела, опирающегося на неподвижные точки. Для тела, имеющего форму эллипса, построен и проанализирован фазовый портрет системы при различных значениях параметров, характеризующих форму эллипса и расположение точек, на которые он опирается.

Составной частью разработок управляемых протезов и экзоскелетов является создание и исследование биомеханических моделей искусственных суставов, анализ контактных взаимодействий внутри суставов и формоизменения поверхностей суставных элементов при трении на базе решения износоконтактных задач [6]. При этом важным является параметрический анализ величин максимальных растягивающих и касательных напряжений, а также нахождение мест их концентрации как внутри, так и на поверхности сустава [7].

Рассмотренные задачи тактильного осязания открывают новую область для приложений методов и подходов механики контактных взаимодействий и теории управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №09-01-00593-а, 09-08-92003-ННС_а, 10-08-92001-ННС_а, 10-07-00691-а).

Список литературы

1. Садовничий В.А. и др. Применение методов механики контактных взаимодействий при диагностике патологических состояний мягких биологических тканей. М.: МГУ, 2009. 306 с.
2. Schostek S. et al. Artificial tactile feedback can significantly improve tissue examination through remote palpation // *Surg. Endosc.* 2010. No 24(9). P. 2299–2307.
3. Горячева И.Г. и др. О применении сенсорного метода для определения механических свойств мягких

тканей // Биомеханика 2010: Тез. докл. X Всерос. конф. Саратов, май, 2010 г. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. С. 60–61.

4. Goryacheva I.G. et al. Visual sensor approach for the determination of mechanical properties of soft biological tissues // Proc. of the First IFToMM Asian Conf. on Mechanism and Machine Science: Taipei, October, 2010. (internet version).

5. Chien-ShienYeh et al. Development of vision-based tactile sensor for palpation of pathological soft tissues /

C.T. Lim and J.C.H. Goh (Eds.) // WCB 2010: IFMBE Proceedings 31. 2010. P. 1270–1273.

6. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.

7. Горячева И.Г. и др. Биомеханическая модель большого пальца руки // Высокие технологии. Фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине: Сб. трудов Первой междунар. научно-практич. конф. / Под ред. А.П. Кудинова, Б.В. Крылова. М.: PhysioMedi, 2010. С. 94–96.

THE ISSUES OF DEVELOPING ROBOTIC AND BIOMECHATRONIC SYSTEMS WITH TACTILE SENSING

I.G. Goryacheva, Yu.G. Martynenko

Fundamental issues of developing artificial tactile mechanical receptors designed for the sensing of robotic and biomechatronic systems are discussed. The problems of diagnosing pathologies of soft biological tissues are considered. Possible approaches to processing data from video-tactile sensors are suggested, based on the methods of contact interaction mechanics. The problem of determining the form of a solid body using palpation is analyzed. Prospective studies of biomechatronic systems with tactile sensing are reviewed. One of the components of such studies is the development of biomechanical models of artificial joints, analysis of contact interaction inside the joints and the change of form of the surface of the elements of the joints. The results of the analytical and numerical studies are compared with the experimental data obtained for particular robotic and biomechatronic systems.

Keywords: diagnostics, contact interactions, analytical and numerical studies, experimental data, robotic and biomechanical systems.