

Отчет за 2024 год

Название проекта: Исследование методов измерения и управления силой на основе 3D-ультразвука в реальном времени для роботизированной биопсии простаты.

СПБГУ

Имя заявителя: Олег Н. Граничин (профессор)
Алексей Тихонов (профессор)
Наталья Амелина (старший научный сотрудник)

Факультет/школа/институт: Кафедра математики и механики, Санкт-Петербургский

государственный университет

Электронная почта: o.granichin@spbu.ru

Телефон: +7 (921) 7400337

Общая сумма вознаграждения: ₹ 500000

Потраченная сумма: ₹ 279066

Остаток: 220934 ₹

HUST

Имя заявителя: Сюмин Чжан (доцент)
Хуагэн Лян (профессор медицины)
Минвэй Вэнь (аспирант)

Ибо Ван (магистрант)

Бин Юй (магистрант)

Факультет/школа/институт:

Школа естественных наук и технологий

Электронная почта: zxmboshi@hust.edu.cn

Телефон: +86-15926234672

Общая сумма вознаграждения: ¥ 60000

Потраченная сумма: ¥ 60000

Остаток: ¥ 0

Обзор мероприятий

1. Целью проекта является определение силы прокола и реализация контроля силы прокола. Стремясь к этой цели, мы реализовали оценку деформаций простаты в режиме реального времени на 3D ультразвуковых изображениях, используя метод регистрации на основе сегментации, и реализовали контроль силы прокола.

2. Что касается оценки деформаций простаты, предлагаемый метод сегментации работает полуконтролируемым образом, объединяя механизм самовнимания (SAM) и V-Net. Во-первых, кодер SAM-Med3D и кодер V-Net используются для выполнения параллельного кодирования на маркированных и немаркированных изображениях. После масштабирования результатов двойного кодирования выполняется слияние признаков перед повышением частоты дискретизации для получения многомерных векторов признаков. Затем принимается стратегия обучения на основе взаимно согласованных ограничений с несколькими декодерами для декодирования слитых признаков и оценки неопределенности. Между тем, функция резкости применяется к выходу вероятности каждого декодера для получения мягких псевдометок для взаимных ограничений согласованности. Наконец, взаимное обучение проводится между выходом вероятности одного декодера и мягкими псевдометками других декодеров. Минимизируя функцию потерь среднеквадратичной ошибки (MSE), различия в результатах декодирования уменьшаются, тем самым побуждая модель генерировать минимизацию энтропии в процессе обучения. Мы протестировали этот метод на ультразвуковых изображениях простаты. Результаты показывают, что предлагаемый метод может реализовать точную сегментацию простаты с Dice 0,932.

3. Что касается оценки деформаций простаты, предлагаемый метод регистрации использует глубокую основанную на обучении многомасштабную структуру регистрации изображений, которая использует признаки, закодированные большой языковой моделью LLaMA с различными разрешениями, и использует адаптеры для сопоставления этих признаков с соответствующими стадиями разрешения, тем самым прогнозируя поля деформации и достигая

регистрации ультразвуковых изображений простаты. Во-первых, два отдельных кодировщика используются для независимого извлечения глубоких признаков из движущихся и неподвижных изображений. Эти признаки сегментируются в токены признаков и подаются в кодировщик LLaMA. Для адаптации модели LLaMA к задаче регистрации вводятся адаптеры, состоящие из линейных проекций. Эти адаптеры служат для отображения визуальных признаков в языковое пространство и языковых признаков обратно в визуальное пространство, позволяя модели выполнять выравнивание и преобразование признаков на разных этапах разрешения. Функция потерь для метода регистрации на основе LLaMA состоит из потери сходства и потери регуляризации. Потеря сходства использует среднеквадратичную ошибку (MSE) в качестве метрики сходства для оценки сходства между деформированным движущимся изображением и неподвижным изображением. Потеря регуляризации используется для обеспечения гладкости поля деформации, избегая складывания и искажения деформации. Результаты показывают, что предложенный метод может реализовать точную сегментацию простаты с Dice 0,912 и ошибкой целевой регистрации (TRE) 1,20 мм.

4. Что касается определения силы, предлагаемый метод использует пространственно-временной локально-глобальный преобразователь для захвата локальных деталей изображения и глобальной зависимости одновременно для изучения особенностей деформаций простаты для оценки силы. В частности, наш метод исследует как пространственные, так и временные механизмы внимания для изучения признаков. Между тем, два эффективных модуля локально-глобального внимания вводятся для снижения нагрузки на 4D пространственно-временные вычисления за счет использования факторизованной стратегии пространственно-временной обработки, тем самым облегчая быструю оценку силы. Эксперименты на фантоме простаты и собаках породы бигль показывают, что наш метод значительно превосходит существующие методы VFS и другие модели пространственно-временных преобразователей. Предложенный метод превосходит наиболее конкурентоспособный сравниваемый метод ResNet3dGRU, предоставляя средние абсолютные ошибки оценки силы, т. е. $60,4 \pm 50,4$ миллиньютон (мН) против $123,7 \pm 95,6$ мН, на трансабдоминальном ультразвуковом наборе данных собак.

5. Что касается моделирования силы сопротивления элементов неоднородной среды для управления силой, то предлагается принципиально новый подход. Предлагаемый подход подразумевает введение рандомизированного контролируемого воздействия, которое увеличит чувствительность сенсорного элемента и уменьшит силу воздействия на среду (ткани).

Моделирование силы сопротивления элементов неоднородной среды осуществляется по измерениям, полученным после воздействия контролируемым элементом, оснащенным датчиком, и исследованию степени деформации среды. При превышении допустимого воздействия для среды происходит инерционное движение контролируемого элемента, которое может выйти за допустимые пределы траектории.

6. Что касается рандомизированных стратегий управления, основанных на проектировании нестационарных алгоритмов идентификации параметров в условиях значительных неопределенностей, разработан подход к идентификации на основе данных наблюдений, включая трехмерные ультразвуковые изображения и расчетную силу прокола. Идентификация параметров означает, что оценки последовательно строятся для возможных значений неизвестных параметров, а затем используются в параметризованном контуре обратной связи. В этом контексте мы рассматриваем задачу определения на основе входных и выходных данных доверительной области, содержащей неизвестные коэффициенты с заданной вероятностью, выбранной пользователем. В

проекте для получения неасимптотических доверительных областей для траектории управляемого объекта (например, иглы) в условиях значительных неопределенностей мы используем метод Leave-out Sign-Dominant Correlation Regions (LSCR) и изучаем нелинейный случай. Как правило, требуется найти единственное (суб)оптимальное решение, принадлежащее доверительной области среди набора допустимых параметров системы. В случае ограниченных, но в остальном произвольных шумов в формулировке алгоритма идентификации мы используем рандомизацию стратегии управления, что позволит получать сколь угодно малые доверительные множества асимптотически.

7. Что касается разработки алгоритма управления в реальном времени, то методы управления на основе нейронной сети призваны реализовать управление силой прокола и траекторией иглы. Здесь на основе данных 3D УЗИ строится номинальная траектория объекта управления (например, иглы). Особенностью обучения нейронной сети в рассматриваемой задаче является поступление обученной выборки в реальном времени, что влечет за собой необходимость оптимизации изменяющегося во времени функционала среднего риска. Для отслеживания требуемых параметров модели нейронной сети предлагается использовать методы рандомизированной стохастической аппроксимации с постоянным шагом, что работоспособно при неизвестных, но ограниченных возмущениях. Кроме того, для обучения нейронных сетей требуются большие объемы выборок. Однако накопление достаточного количества данных для повышения точности моделей невозможно или труднодостижимо. Для таких случаев мы будем использовать новый подход, который фокусируется на обучении на образцах небольшого размера (обучение с малым количеством выстрелов). Успешная работа многих стандартных контролируемых алгоритмов машинного обучения требует четкой модели данных, возможности вычисления градиента для функции потерь (функционал качества) и большого объема обучающих данных с распределением, близким к нормальному. Однако эти требования часто не выполняются. Для таких случаев проект предлагает исследование методов рандомизированной стохастической аппроксимации для решения указанной проблемы.

8. Что касается оценки эффективности методов измерения и контроля силы прокола, используется фантом простаты с поражениями. Робот для прокола простаты, система трехмерного ультразвукового наведения в реальном времени и система сбора данных о силе прокола используются для сбора трехмерных ультразвуковых изображений до и во время прокола фантома простаты. На основе вышеизложенной информации ошибка между ожидаемой целевой точкой и положением, в котором игла контролируется для достижения в простате, используется для оценки точности прокола алгоритма управления. Экспериментально установлено, что ошибка алгоритмов управления составляет 2 мм на фантоме простаты.

На основе вышеприведенных исследований китайская сторона опубликовала несколько статей по своей части и получили ряд патентов. По совместно разрабатываемым алгоритмам рандомизации управляющего воздействия публикация готовится, но она пока еще только в предварительной стадии.

Мероприятия и студенческая активность

Дата: 7 ноября 2024 г.

Участники:

Сюмин Чжан, Минвэй Вэнь, Ибо Ван, Минюэ Дин, Мин Ючи, Олег Граничин, Наталья Амелина

Мероприятие:

Обе стороны представили достижения в области исследований ультразвуковой визуализации и достижения в области ультразвуковой хирургической навигации и роботизированного управления, обсудили влияние качества и размера ультразвукового изображения на навигацию и роботизированное управление и определили пути повышения качества ультразвукового изображения. Кроме того, было проведено подробное обсуждение своей совместной статьи «Метод полуконтролируемой сегментации 3D-медицинских изображений на основе V-Net и двойного кодировщика и мультидекодера SAM», предложены изменения в методе представления результатов сегментации изображений и стратегии ускорения обучения моделей, что значительно улучшило качество статьи. В будущем обе стороны рассмотрят возможность внедрения ультразвуковой КТ для хирургической навигации и будут стремиться повысить скорость обработки ультразвуковых изображений для обеспечения хирургической навигации в реальном времени. Кроме того, мы углубим их сотрудничество для исследования новых методов обучения моделей, направленных на сокращение использования памяти во время обучения моделей. Кроме того, три исследователя с российской стороны посещают Wuhan Micro Vision Technology Co., Ltd, чтобы узнать об ультразвуковой КТ.

Краткое содержание мероприятия:

Это мероприятие имеет большое значение для обеих сторон, поскольку позволяет им понять ход исследовательской работы друг друга, существующие проблемы и последующие рабочие договоренности, закладывая прочную основу для будущего сотрудничества.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

(f)

Рис. 1 Встреча с обеих сторон: (a)-(d) Обсуждение методов измерения и контроля силы; (e) Обсуждение ультразвуковой КТ; (f) Посещение Wuhan Micro Vision Technology Co., Ltd.

Влияние

Реализация этого проекта может эффективно способствовать развитию и совершенствованию теорий восприятия и управления роботизированной силой, продвигая применение хирургических роботов в процедурах биопсии мягких тканей, таких как биопсия простаты. Он имеет большое значение для улучшения здоровья мужчин в Китае, России и даже во всем мире. Кроме того, этот проект стал достойным примером научного и технологического сотрудничества между Хуачжунским университетом науки и технологий и Санкт-Петербургским государственным университетом, заложив прочную основу для дальнейшего углубленного сотрудничества между двумя сторонами.

Дополнительное финансирование

Мы планировали получить поддержку на международный проект сотрудничества, спонсируемый Национальным естественнонаучным фондом Китая (NSFC) и Российским научным фондом (RSF) в 2025 году. Название проекта: «Методы искусственного интеллекта и 4D-ультразвуковой навигации и управления при роботизированной пункции мягких тканей». Ожидаемое внешнее финансирование с китайской стороны составляет 1 500 000 юаней. Ожидаемое внешнее финансирование с российской стороны составляет 21 000 000 рублей. Были поданы заявки с обеих сторон. В РФФ заявка была зарегистрирована под № 25-41-00053. К сожалению, при трех положительных и высоких рецензиях проект не был поддержан.

Извлеченные уроки и предложения

Исследовательские группы с обеих сторон организовали многочисленные академические обмены, семинары и другие мероприятия через онлайн и офлайн каналы. Эти мероприятия способствовали академическим обменам и визитам между исследовательскими группами, углубляя взаимопонимание и сотрудничество.

В нашем сотрудничестве исследовательские группы подчеркивали междисциплинарную интеграцию, включая перекрестное сотрудничество в таких областях, как инженерия, медицина и информатика. Этот междисциплинарный подход дал эффективные инновационные результаты. Благодаря сотрудничеству обе стороны расширили свои международные горизонты, получили представление о международных академических границах и тенденциях и повысили международную конкурентоспособность и влияние своих исследовательских групп. Это включает в себя такие возможности, как языковое общение и межкультурный обмен, которые имеют большое значение для осуществления большего сотрудничества на международной арене в будущем.

Подводя итог, можно сказать, что это сотрудничество принесло исследовательским группам с обеих сторон богатый опыт и достижения. Этот опыт и достижения не только способствовали развитию научных исследований и развитию талантов в обоих университетах, но и внесли положительный вклад в социальный прогресс и развитие.