|  |  |
| --- | --- |
| Abstract—Needle insertion procedures are commonly used for diagnostic and therapeutic purposes. In this paper, an imageguided control system is developed to robotically steer flexible needles with an asymmetric tip. Knowledge about needle deflection is required for accurate steering. Two different models to predict needle deflection are presented. The first is a kinematics-based model, and the second model predicts needle deflection that is based on the mechanics of needle–tissue interaction. Both models predict deflection of needles that undergo multiple bends. The maximum targeting errors of the kinematics-based and the mechanics-based models for 110-mm insertion distance using a φ 0.5-mm needle are 0.8 and 1.7 mm, respectively. The kinematics-based model is used in the proposed image-guided control system. The control system accounts for target motion during the insertion procedure by detecting the target position in each image frame. Five experimental cases are presented to validate the real-time control system using both camera and ultrasound images as feedback. The experimental results show that the targeting errors of camera and ultrasound image-guided steering toward a moving target are 0.35 and 0.42 mm, respectively. The targeting accuracy of the algorithm is sufficient to reach the smallest lesions (φ 2 mm) that can be detected using the state-of-the-art ultrasound imaging systems. Index Terms—Computer-assisted surgery, image-guided control, minimally invasive surgery, needle–tissue interactions, ultrasound.  PERCUTANEOUS needle insertion is one of the most common minimally invasive surgical procedure. Needles are often used for diagnostic and therapeutic applications such as biopsy and brachytherapy, respectively. Clinical imaging techniques such as ultrasound and magnetic resonance images, and computed tomography scans are commonly used during needle insertion procedures to obtain the needle and target positions. Needles that are used in clinical procedures often have a bevel tip to easily cut and penetrate a soft tissue. Such needles naturally deflect from a straight path during insertion, which make them difficult to steer intuitively [1]. Moreover, the needles that are used in surgical procedures are often thick and rigid. Such thick needles cause deformation of tissue, and this can result in target motion, which affects the targeting accuracy [2], [3]. Another disadvantage of using thick needles is that they cause patient trauma. Besides needle deflection and tissue deformation, other possible causes of targeting inaccuracy are patient motion during the procedure and physiological processes such as fluid flow and respiration. Inaccurate needle placement may result in misdiagnosis or unsuccessful treatment. Thin needles were introduced to minimize patient discomfort [4]. Another advantage of using thin needles is that they are flexible and, therefore, facilitate curved needle paths. This enables steering the needle around obstacles (such as sensitive tissues) and to reach locations which are unreachable by rigid needles (see Fig. 1). Manually steering thin, flexible needles toward a desired location is challenging [5]. Using a robotic system which automatically steers the needle can assist the clinician. Such a system requires a model to predict the needle deflection to steer the needle to reach a certain location. This paper presents two different models to predict needle deflection. The first is a kinematics-based model, which assumes that the needle tip follows a circular path. This model is based on the unicycle model that was presented by Webster et al. [6], but modifications are made to account for cutting tissue at an angle by bevel-tipped needles. The second model is a mechanics-based model which predicts deflection using needle–tissue interaction forces [7]. The mechanics-based model to predict deflection of needles undergoing multiple bends is presented in this study. Both models are validated using double-bend experiments (see Fig. 1). In this study, image feedback is combined with the kinematics-based deflection model to steer the needle toward a target. Charge-coupled device (CCD) camera images are used for image feedback in the first set of experiments to evaluate the tracking and steering algorithms. Experiments are then performed using ultrasound images to demonstrate that the presented framework is applicable to a clinical imaging modality. To the best of our knowledge, the use of ultrasound images to steer a bevel-tipped flexible needle (φ 0.5 mm diameter) toward a moving target (less than 2 mm diameter) has not been investigated. The study also provides a method that allows the needle to move along a certain path using set points during the insertion into a soft-tissue phantom. The elasticity of the phantom affects the needle deflection [8], [9]. An acoustic radiation force impulse (ARFI) technique is an ultrasound-based noninvasive method that is used to measure the elasticity of the soft-tissue phantom. This paper is organized as follows: Section II presents the related work in the area of flexible needle steering. Section III describes the needle deflection models and the experimental setup used for model validation. Section IV presents the control system that is used to steering the needle during insertion and the image processing techniques that are used for feedback. In Section V, the experimental results are presented, followed by Section VI, which concludes and provides directions for future work.  II. RELATED WORK In the recent years, several research groups have developed algorithms for image-guided needle steering. Some of these algorithms encompass needle deflection models (see Section II-A), and techniques to track the needle tip and target in real time (see Section II-B). In this section, algorithms that were used in previous studies are discussed. The section also concludes by briefly presenting our proposed method for needle steering. DiMaio and Salcudean [10] were among the first to investigate steering needles through a soft tissue. They developed a needle Jacobian which relates needle base motion outside the tissue to needle tip motion inside the tissue. Maneuvering the needle base causes the soft tissue around the needle to deform, and this enabled them to place the needle tip at a desired location. Glozman and Shoham [5] also used base maneuvering to steer the needle. A model was used to simulate the interaction between a needle and a soft tissue. Needle steering was accomplished by solving the forward and inverse kinematics of this model. Neither DiMaio and Salcudean [10] nor Glozman and Shoham [5] used needles with an asymmetric tip. The advantage of using needles with asymmetric tips is that the needle deflection can be used for steering. The direction of deflection (in the planar case) is changed by rotating the needle 180◦ during insertion (see Fig. 1). Several research groups have focused on the steering of flexible needles with a bevel tip, e.g., [1], [6], [11]–[18]. The deflection of a needle with a bevel tip can also be controlled using duty cycle rotation [19].  A. Needle Deflection Models  Webster et al. [6] presented an approach in which they used the kinematics of unicycle and bicycle models to predict the needle deflection. In their work, they assumed that the needle tip moves along a circular path. The unicycle model assumed that the paths followed by the needle before and after rotation are tangent to each other. In the bicycle model, the paths before and after rotation are not assumed to be tangent to each other. They assumed relatively stiff tissue and showed that their model agrees with experiments. The kinematics-based model by Webster et al. is limited since it did not account for needle–tissue interaction along the length of the needle. Several groups focused on a mechanics-based approach to model needle deflection. They used the interaction between the needle and surrounding tissue to predict the needle curvature. Alterovitz et al. [12] presented a planning algorithm for a needle with a bevel tip to determine the insertion point in order to reach a desired target. Finite-element (FE) modeling was used to model the needle–tissue interaction, and this was employed in their planner to account for soft-tissue deformation. FE modeling requires computing power that is not convenient to implement in real-time control. Therefore, analytical needle deflection models were proposed to predict the deflection of needles with a bevel tip during insertion in a soft tissue [9], [13], [20], [21]. Kataoka et al. [20] presented a force-deflection model, where they assumed a constant force per unit needle length. This assumption resulted in discrepancies with the experimental deflection. Abolhassani and Patel [13] described a model that related force/torque data at the needle base to deflection. They did not account for tissue deformation along the needle shaft. This led to errors between measured and predicted deflections. Misra et al. [21] presented a mechanics-based model that predicted needle deflection using the Rayleigh–Ritz formulation. Roesthuis et al. [9] extended this model by adding spring supports along the needle shaft. However, none of these models could predict the needle deflection for the case when the needle is rotated during insertion (i.e., multiple bends). The authors presented a mechanics-based model to predict deflection of a needle undergoing multiple bends [7]. In addition to the mechanics-based model, a modification of the unicycle model is presented in this study. This model requires fewer parameters than the bicycle model to describe needle deflection accurately. This kinematics-based model is compared with the mechanicsbased model. The deflection model and real-time needle tracking are used to develop a feedback control system to steer flexible needles.  B. Needle and Target Tracking  In previous studies, a needle (without a bevel tip) and target positions were tracked in fluoroscopic and ultrasound images using image processing algorithms [5], [22]. In ultrasound images, the needle visibility is affected by the operator’s skill in aligning the needle in the ultrasound imaging plane [22], [23]. Okazawa et al. [24] developed two algorithms that were based on the Hough transform to detect the needle shape in ultrasound images during insertion. There are other segmentation techniques that can be used for needle tracking based on corner detection and subtraction [22], [25]. The main advantage of the subtraction and corner detection techniques is that the required processing time is short, which makes these techniques suitable for real-time applications. The disadvantage of using the subtraction method is that it is sensitive to motion of a soft tissue. Corner detection is immune to such artifacts that may appear in the image outside the processed region. Magnetic tracking sensors [26], [27] and fiber optic strain sensors [28] were also used for real-time needle tracking. Tracking the needle tip slope and the target position is also required to steer the needle. The tip slope changes during insertion due to needle deflection. Target displacements over 2.0 mm have been measured during placement of a biopsy needle in the breast [2], [29]. Target displacement introduces targeting errors [3]. The target position needs to be measured in each frame in order to increase the targeting accuracy of the steering algorithm.  C. Proposed Algorithm for Steering  In this study, two different (kinematics-based and mechanicsbased) needle deflection models are presented. A revised set of experiments are performed to compare the results of the models. The kinematics-based model is used in the proposed control system. The system uses processed images for feedback control. A real-time needle tracking algorithm is developed based on processing camera and ultrasound images. The Harris corner detection technique is used for tracking the needle (φ 0.5 mm) tip position. The algorithm that is used to measure the tip slope is based on image moments [30], [31]. The displacement of the target is detected to reduce the targeting error. Target motion is measured by calculating the centroid of the target shape using image moments [32]. The tracked moving target is of φ 2.0 mm. The proposed algorithms for needle and target motion tracking are applicable for both CCD camera and ultrasound images. The tracking algorithms are suitable for real-time applications. The steering algorithm uses set points to specify a certain path for the needle to follow during insertion. In the control system, it is assumed that the needle follows a circular path during insertion. This assumption was used in previous studies [6], [12]. Deviation of the needle from its planned path due to disturbances or inaccurate assumptions is corrected in real time by the developed algorithm.  III. NEEDLE DEFLECTION MODELS  In this section, two models to predict needle deflection are presented. Both models assume that the needle bends in plane (2-D). The first model uses a kinematics-based approach, while the second model is based on the mechanics of needle–tissue interaction. Both models assume that the needle shaft follows the path that is described by the needle tip. The experimental setup and the soft-tissue phantom used are described. Experiments are presented to fit the parameters of both models. Experiments are performed to validate both models in the case of steering toward a target with a single rotation.  A. Kinematics-Based Model  The idea of using nonholonomic kinematics to describe the needle path of a flexible, bevel-tipped needle has been demonstrated by Webster et al. [6]. The approach assumes that the needle tip follows a circular path. They proposed using a unicycle model with a steering constraint to describe the circular needle path. The unicycle model could not describe the needle path when needle rotation is performed during insertion. This is due to the fact that the circles describing the needle path before and after needle rotation are not tangent to each other [see Fig. 2(a)]. To describe the nontangent needle path, the bicycle method is used. In this study, a modification of the kinematics-based unicycle model is presented, which accounts for the nontangent needle path (see Fig. 2). It has been observed that a bevel-tipped needle cuts the tissue at an angle from the central axis of the needle [12], [21]. We denote this angle as the cut angle β. The cut angle is modeled by placing a frame at the needle tip (Ψt), which is rotated by the cut angle with respect to the central axis of the needle [see Fig. 2(b)]. The needle tip travels through a soft tissue in the direction that is indicated by xt. Rotation of the needle around its central axis results in a change of direction of xt [see Fig. 2(c)]. This causes the needle tip to follow a path which is not tangent to its path before rotation [see Fig. 2(a)]. The needle tip follows the circumference of a circle (center c and radius rt) as shown in Fig. 2(a). The needle tip lies at the origin of frame Ψt; expressed in the global coordinate frame this becomes o0 t = [ xtip ytip ztip ] T . Since planar needle deflection in the x0 y0 -plane is assumed, ztip equals zero. The needle deflection ytip can be expressed as a function of the needle tip x-coordinate xt  Да    where c0 x and c0 y are the x- and y-coordinates of the circle centre expressed in the global coordinate frame (Ψ0 ), respectively. The circle centre coordinates c0 that are expressed in the global coordinate frame are calculated by performing a homogeneous transformation    where ct are the homogeneous coordinates of the circle centre expressed in the tip frame    In (2), H0 t represents the homogeneous transformation from the tip coordinate frame to the global coordinate frame    The rotation matrix R0 t depends on the orientation of the bevel tip (see Fig. 3). In the case of the bevel face pointing up, the tip frame (Ψtu ) needs to be rotated by the cut angle about the ztu -axis to align it with the central axis of the needle    If the bevel face is pointed down, the frame Ψtd first needs to be rotated about the ztd -axis by the cut angle, then a rotation of ϕ about the xtd -axis is required to align it with the central axis of the needle    Finally, a rotation equal to the needle tip slope θ around the z1 - axis has to be performed to align the x1 -axis with the x0 –axis    Thus, for the bevel face pointing up, R0 t in (4) is calculated by    and for the bevel face pointing down this is    Using (2)–(9), needle tip position (xtip ,ytip ), and needle tip slope θ, the centre of the circle ci+1 that describes the next needle path can be determined at each instant during insertion. This allows predicting the future needle path if a rotation is to be made. This is essential to steer the needle, which will be discussed in later sections.  B. Mechanics-Based Model  A needle is subjected to needle–tissue interaction forces when it is inserted into a soft tissue [see Fig. 4(a)]. When the needle travels through the tissue, force is required to cut the tissue and create a path through the tissue. This is modeled by a force at the tip of the needle Ft. If the needle has an asymmetric tip, the forces at the needle tip have an uneven distribution, causing the needle to deflect from a straight insertion path [21]. In the case of a bevel-tipped needle, the tip force is considered to act normal to the bevel face. When the needle travels through the tissue, friction acts on the needle shaft. This is modeled by a force Ff acting tangent to the needle shaft. As the needle is inserted, it is supported by the surrounding tissue. The force exerted by the tissue surrounding the needle (i.e., an elastic support) is modeled as a distributed load (w(x)) along the inserted part of the needle.  The needle is modeled as a cantilever beam [see Fig. 4(b)]. Assuming small needle deflections, only transversal needle deflection is considered. The needle is stiff in the axial direction, and hence, shortening of the needle is not considered. When the needle is inserted without being rotated, it has a single-bend shape [see Fig. 5(a)]. The needle deflects due to a combination of the distributed load and the tip force. Needle rotation is performed when the insertion distance equals the rotation distance (xt = xr ). This results in a change of orientation of the bevel tip, and hence, the tip force also changes direction [see Fig. 5(b)]. This causes the needle to deflect in the opposite direction. For a single rotation, this results in the needle having a double-bend shape. To model this, the part of the needle before rotation is fixed by a series of springs. Given a sufficiently small spring spacing Δl, one can approximate an elastic foundation [33]. The stiffness of such an elastic foundation K0 is described in terms of stiffness per unit length and depends on needle and tissue properties. The length of the foundation in Fig. 5(b) equals xr − x0 , resulting in a foundation stiffness Kt of    For a total number of m springs, this results in a spring stiffness Ks of Kt m . The distributed load is applied to the part after rotation and this enables modeling of a needle undergoing multiple bends. To evaluate the deflected needle shape (v(x)) under the action of distributed load and tip force, the Rayleigh–Ritz method is used. Rayleigh–Ritz is a variational method in which equilibrium of the system is established using the principle of minimum potential energy [34]. For a mechanical system, the total potential energy is expressed as    where U represents the energy that is stored in the system, and W is the work done on the system by external forces. To find the deflected needle shape using the Rayleigh–Ritz method, an assumed displacement (shape) function has to be defined. Several shape functions were evaluated, and it is found that a cubic function is a suitable shape function    For complex needle shapes, a single shape function as in (12) is not sufficient to approximate the deflected needle shape. Therefore, the needle is divided [see Fig. 4(b)] into a number of elements n, each described by their own shape function (vi(x))    The unknown coefficients a0,i,...,a3,i are determined using the Rayleigh–Ritz method. For the first needle element (i = 1), xi−1 equals xb , and for the last element (i = n), xi equals xt. Each of the shape functions has to satisfy the geometric boundary conditions of the system. Since the needle is fixed at the base, the needle slope θ(x) and deflection v(x) are zero at the base    Furthermore, the shape functions have to satisfy continuity conditions, meaning constant deflection and needle slope at the boundaries of the elements    For the single-bend case [see Fig. 5(a)], the stored energy equals the strain energy due to transversal needle bending (U = Ub ). Using Euler–Bernoulli beam theory [35], the strain energy due to transversal bending Ub is found to be    where E and I represent the Young’s modulus and second moment of inertia of the needle, respectively. The needle is cylindrical and EI is constant along the length of the needle. For a needle undergoing multiple bends, energy is also stored in the springs [see Fig. 5(b)]. The stored energy is the sum of the energy due to needle bending as defined in (17) and the spring energy for a total number of m springs    where Ks represents the spring stiffness, and v(xk ) is the amount of deflection for the kth spring with respect to the bend configuration, as shown in Fig. 5(b). The work done on the system by external forces is the sum of the work done by the distributed load Wd and concentrated tip load Wc :    The work done by the distributed load is given by    and the work done by concentrated tip load is given by    where v(xt) is the deflection at the needle tip. The shape functions defined in (14) are substituted in the equations for the stored energy [see (17) and (18)] and work [see (20) and (21)]. This results in the total potential energy of the system, defined in (11), to be a function of the shape functions, and hence the unknown coefficients    The equilibrium of the system is found by taking the partial derivative of the total potential energy with respect to each of the shape functions’ unknown coefficients    for k = 0, 1, 2, 3 and i = 1,...,n. The unknown coefficients ak,i are calculated by solving the system of equations obtained in (23). Substitution of the coefficients back into (13) and (14) gives the deflected needle shape. Experimental data are used to evaluate the parameters for both needle deflection models. These parameters are the radius of curvature and the cut angle for the kinematics-based model and the distributed load for the mechanics-based model. In the next sections, the experimental setup is first introduced, and then experiments are presented which are used to evaluate the parameters. With the parameters known, both models are then validated in a series of (open-loop) steering experiments.  C. Experimental Setup  The experimental setup used to insert needles into soft-tissue phantoms is shown in Fig. 6 [9]. The setup has two degrees of freedom: translation along and rotation about the insertion axis  for steering. A Sony XCDSX90 CCD FireWire camera (Sony Corporation, Tokyo, Japan) is mounted 450 mm above the setup and is used for imaging. For ultrasound imaging, a Siemens ACUSON S2000 (Siemens Healthcare, Mountain View CA) is used. The needle is made of Nitinol wire (φ 0.5 mm). Nitinol is a nickel–titanium alloy which, at a certain temperature range, has the property of being superelastic. This means the needle can undergo very large elastic deformations, without plastically deforming, allowing it to return to its initial (straight) shape. Nitinol (E = 75 GPa) is also more flexible than steel (E = 200 GPa); this increases the deflection and, hence, improves the steering capabilities of the needle. The needle tip is polished to a bevel angle α of 30◦. Gelatin is used as a soft-tissue phantom. Gelatin phantoms are made by mixing gelatin powder (Dr. Oetker, Bielefeld, Germany) with water at a temperature of 40 ◦C. The mixture is then put in a plastic container (170 × 30 × 200 mm3 ). The gel solidifies after 5 h at a temperature of 7 ◦C. For a gelatin-to-water mixture (by weight) of 14.9%, the elasticity is found to be 35.5 kPa. This elasticity is similar to what is found in breast tissue [36]. The elasticity is determined in a uniaxial compression test using the Anton Paar Physica MCR501 (Anton Paar GmbH, Graz, Austria). van Veen et al. [8] investigated the effect of several system parameters on needle deflection including soft-tissue phantom elasticity. Each needle insertion is done at a new location in the soft-tissue phantom to avoid influence of previous insertions on the current experiment. | Абстрактные - процедуры введения игл обычно используются для диагностических и терапевтических целей. В этой статье разработана система управления графическим интерфейсом для роботизированного управления гибкими иглами с асимметричным наконечником. Знание об изгибе иглы требуется для точного рулевого управления. Представлены две разные модели для прогнозирования отклонения иглы. Первая - это модель на основе кинематики, а вторая - модель, предсказанная взаимодействием игольчатой ​​ткани. Обе модели прогнозируют отклонение игл, которые подвергаются нескольким изгибам. Максимальные ошибки таргетинга для расстояния ввода 110 мм составляют соответственно 0,5 и 0,8 мм. Модель, основанная на кинематике, используется в предлагаемой системе управления изображением. Система управления учитывает целевое движение. Представлены пять экспериментальных случаев для проверки системы управления в реальном времени с использованием как фотокамер, так и изображений ультразвука в качестве обратной связи. Экспериментальные результаты показывают, что ошибки таргетинга камеры и ультразвука направлены соответственно на 0,34 и 0,42 мм. Точность таргетинга алгоритма достаточна для достижения наименьших повреждений (φ 2 мм), которые могут быть обнаружены с использованием современных ультразвуковых систем визуализации. Индексные термины - компьютерная хирургия, управление с помощью изображения, минимально-инвазивная хирургия, взаимодействие иглой и тканью, ультразвук.  3997/5000  ПЕРЧАТАЯ Вставка иглы - одна из наиболее распространенных минимально инвазивных хирургических процедур. Иглы часто используются для диагностических и терапевтических применений, таких как биопсия и брахитерапия, соответственно. Клинические методы визуализации, такие как ультразвуковые и магнитно-резонансные изображения, и компьютерные томографические сканирования обычно используются во время процедур ввода иглы для получения положения иглы и цели. Иглы, которые используются в клинических процедурах, часто имеют наконечник скоса, который легко разрезает и проникает в мягкие ткани. Такие иглы естественным образом отклоняются от прямого пути во время вставки, что затрудняет их интуитивное управление [1]. Кроме того, иглы, которые используются в хирургических процедурах, часто толстые и жесткие. Такие толстые иглы вызывают деформацию ткани, и это может привести к движению цели, что влияет на точность таргетинга [2], [3]. Другим недостатком использования толстых игл является то, что они вызывают травму пациента. Помимо отклонения иглы и деформации ткани, другими возможными причинами неточности нацеливания являются движение пациента во время процедуры и физиологические процессы, такие как поток жидкости и дыхание. Неточное размещение иглы может привести к неправильному диагнозу или безуспешному лечению. Для минимизации дискомфорта пациента были введены тонкие иглы [4]. Другим преимуществом использования тонких игл является то, что они являются гибкими и, следовательно, облегчают изогнутые траектории иглы. Это позволяет вращать иглу вокруг препятствий (таких как чувствительные ткани) и достигать мест, которые недоступны жесткими иглами (см. Рис.1). Ручное управление тонкими гибкими иглами в нужное место затруднено [5]. Использование роботизированной системы, которая автоматически управляет иглой, может помочь клиницисту. Для такой системы требуется модель для прогнозирования отклонения иглы, чтобы направлять иглу в определенное место. В этой статье представлены две разные модели для прогнозирования отклонения иглы. Первая - это модель на основе кинематики, которая предполагает, что кончик иглы следует по круговой траектории. Эта модель основана на модели одноколесного велосипеда, которая была представлена ​​Webster et al. [6], но изменения сделаны для учета резки ткани под углом иглой с наклонной головкой. Вторая модель представляет собой модель на основе механики, которая предсказывает отклонение с использованием сил взаимодействия иглы и ткани [7]. В этом исследовании представлена ​​модель, основанная на механике для прогнозирования отклонения игл, проходящих множество изгибов. Обе модели проверяются с использованием экспериментов с двойным изгибом (см. Рис.1). В этом исследовании обратная связь изображения комбинируется с моделью отклонения на основе кинематики, чтобы направлять иглу к цели. Изображения камеры с зарядовой связью (CCD) используются для обратной связи изображения в первом наборе экспериментов для оценки алгоритмов отслеживания и рулевого управления. Затем проводят эксперименты с использованием ультразвуковых изображений, чтобы продемонстрировать, что представленная структура применима к клиническому методу визуализации. Насколько нам известно, использование ультразвуковых изображений для управления гибкой иглой (диаметром 0,5 мм) в сторону движущейся мишени (диаметром менее 2 мм) не исследовалось. В исследовании также представлен метод, который позволяет игле двигаться по определенному пути с использованием заданных точек во время введения в фантом мягкой ткани. Эластичность фантома влияет на отклонение иглы [8], [9]. Метод импульсного акустического излучения (ARFI) представляет собой неинвазивный метод, основанный на ультразвуке, который используется для измерения эластичности фантома мягких тканей. Эта статья организована следующим образом: в разделе II представлены соответствующие работы в области гибкого управления иглой. В разделе III описаны модели отклонения иглы и экспериментальная установка, используемая для проверки модели. В разделе IV представлена ​​система управления, которая используется для рулевого управления иглой во время вставки и методов обработки изображений, которые используются для обратной связи. В разделе V представлены экспериментальные результаты, а затем раздел VI, который завершает и дает указания для будущей работы.  В последние годы несколько исследовательских групп разработали алгоритмы для управления иглой с управляемым изображением. Некоторые из этих алгоритмов включают модели отклонения иглы (см. Раздел II-A) и методы отслеживания наконечника иглы и цели в реальном времени (см. Раздел II-B). В этом разделе обсуждаются алгоритмы, использованные в предыдущих исследованиях. В разделе также делается краткое изложение нашего предлагаемого метода управления иглой. DiMaio и Salcudean [10] были одними из первых, кто исследовал рулевые иглы через мягкую ткань. Они разработали иголку Якобиан, которая связывает движение иглы за пределами ткани с движением иглы в ткани. Маневрирование основания иглы заставляет мягкую ткань вокруг иглы деформироваться, и это позволило им разместить наконечник иглы в нужном месте. Glozman и Shoham [5] также использовали базовое маневрирование для управления иглой. Модель была использована для моделирования взаимодействия между иглой и мягкой тканью. Рулевое управление иглой было выполнено путем решения обратной и обратной кинематики этой модели. Ни ДиМайо, ни Салкудейан [10], ни Глозман, ни Шохам [5] не использовали иглы с асимметричным кончиком. Преимущество использования игл с асимметричными наконечниками заключается в том, что прогиб иглы можно использовать для рулевого управления. Направление отклонения (в плоском корпусе) изменяется путем вращения иглы 180◦ во время вставки (см. Рисунок 1). Несколько исследовательских групп сосредоточились на управлении гибкими иголками с наконечником скоса, например, [1], [6], [11] - [18]. Прогиб иглы с наконечником скоса также можно контролировать с помощью поворота рабочего цикла [19].  A. Модели отклонения иглы  Webster et al. [6] представил подход, в котором они использовали кинематику одноцилиндровых и велосипедных моделей для прогнозирования отклонения иглы. В своей работе они предположили, что наконечник иглы движется по круговой траектории. Модель на одноколесных велосипедах предполагала, что траектории, следующие за иглой до и после вращения, касаются друг друга. В модели велосипеда пути до и после вращения не предполагаются касательными друг к другу. Они предположили относительно жесткую ткань и показали, что их модель согласуется с экспериментами. Модель на основе кинематики Webster et al. ограничен, поскольку он не учитывает взаимодействие иглы и ткани вдоль длины иглы. Несколько групп сосредоточились на механическом подходе к моделированию отклонения иглы. Они использовали взаимодействие между иглой и окружающей тканью для прогнозирования кривизны иглы. Alterovitz et al. [12] представил алгоритм планирования иглы с наконечником скоса для определения точки вставки для достижения желаемой цели. Для моделирования взаимодействия между иглой и тканью использовалось моделирование конечных элементов (FE), и это использовалось в их планировщике для учета деформации мягких тканей. Для моделирования FE требуется вычислительная мощность, которую не удается реализовать в режиме реального времени. Поэтому были предложены аналитические модели отклонения иглы для прогнозирования отклонения игл со скошенным наконечником во время введения в мягкую ткань [9], [13], [20], [21]. Kataoka et al. [20] представлена ​​модель отклонения силы, в которой они принимали постоянную силу на единицу длины иглы. Это допущение привело к расхождениям с экспериментальным прогибом. Abolhassani и Patel [13] описали модель, которая связана с данными о силе / крутящем моменте на основании иглы для отклонения. Они не учитывали деформацию ткани вдоль оси иглы. Это привело к ошибкам между измеренными и прогнозируемыми отклонениями. Misra et al. [21] представил модель на основе механики, которая предсказала отклонение иглы с использованием формулировки Рэлея-Ритца. Roesthuis et al. [9] расширили эту модель, добавив пружинные опоры вдоль оси иглы. Однако ни одна из этих моделей не могла предсказать отклонение иглы для случая, когда игла вращается во время вставки (то есть, множество изгибов). Авторы представили модель на основе механики для прогнозирования отклонения иглы, проходящей множество изгибов [7]. В дополнение к модели, основанной на механизме, в этом исследовании представлена ​​модификация модели одноколесного велосипеда. Эта модель требует меньше параметров, чем модель велосипеда, чтобы точно описать отклонение иглы. Эта модель, основанная на кинематике, сравнивается с моделью на основе механики. Модель отклонения и отслеживание иглы в реальном времени используются для разработки системы управления с обратной связью для управления гибкими иглами.  B. Игла и отслеживание целей  В предыдущих исследованиях иглу (без наконечника скоса) и положения мишени отслеживали на рентгеноскопических и ультразвуковых изображениях с использованием алгоритмов обработки изображений [5], [22]. В ультразвуковых изображениях на видимость иглы влияет умение оператора выравнивать иглу на плоскости изображения ультразвука [22], [23]. Okazawa et al. [24] разработали два алгоритма, которые были основаны на преобразовании Хафа для определения формы иглы в ультразвуковых изображениях во время введения. Существуют другие методы сегментации, которые можно использовать для отслеживания иглы на основе обнаружения и вычитания углов [22], [25]. Основным преимуществом методов вычитания и определения угла является то, что требуемое время обработки является коротким, что делает эти методы пригодными для приложений реального времени. Недостатком использования метода вычитания является то, что он чувствителен к движению мягкой ткани. Угловое обнаружение невосприимчиво к таким артефактам, которые могут появляться на изображении вне области обработки. Магнитные датчики слежения [26], [27] и волоконно-оптические тензодатчики [28] также использовались для отслеживания иглы в реальном времени. Отслеживание наклона наконечника иглы и положения цели также необходимо для управления иглой. Наклон наконечника изменяется во время вставки из-за отклонения иглы. Целевые смещения более 2,0 мм были измерены во время размещения иглы для биопсии в груди [2], [29]. Смещение цели приводит к ошибкам таргетинга [3]. Целевое положение необходимо измерять в каждом кадре, чтобы повысить точность таргетинга алгоритма рулевого управления.  C. Предлагаемый алгоритм управления  В этом исследовании представлены две разные модели деформации иглы в кинематике и на основе механики. Для сравнения результатов моделей выполняется пересмотренный набор экспериментов. В предлагаемой системе управления используется модель на основе кинематики. Система использует обработанные изображения для контроля обратной связи. Алгоритм отслеживания иглы в реальном времени разработан на основе обработки камер и ультразвуковых изображений. Метод обнаружения угла Харриса используется для отслеживания положения наконечника иглы (φ 0,5 мм). Алгоритм, используемый для измерения наклона вершины, основан на моментах изображения [30], [31]. Смещение целевого объекта обнаружено для уменьшения ошибки таргетинга. Целевое движение измеряется путем вычисления центроида целевой формы с использованием моментов изображения [32]. Трассируемая движущаяся цель имеет φ 2,0 мм. Предлагаемые алгоритмы отслеживания движения иглы и цели применимы как для ПЗС-камеры, так и для ультразвуковых изображений. Алгоритмы отслеживания подходят для приложений реального времени. Алгоритм рулевого управления использует заданные значения для указания определенного пути прохождения иглы во время вставки. В системе управления предполагается, что игла проходит по круговой траектории во время вставки. Это предположение было использовано в предыдущих работах [6], [12]. Отклонение иглы от ее запланированного пути из-за нарушений или неточных допущений корректируется в реальном времени по разработанному алгоритму.  III. МОДЕЛИ ПРОБЛЕМЫ ИГЛА  В этом разделе представлены две модели для прогнозирования отклонения иглы. Обе модели предполагают, что игла изгибается в плоскости (2-D). Первая модель использует подход, основанный на кинематике, а вторая модель основана на механизме взаимодействия иглы и ткани. Обе модели предполагают, что ось иглы следует по пути, который описывается наконечником иглы. Описаны экспериментальная установка и фантом мягкой ткани. Эксперименты представлены в соответствии с параметрами обеих моделей. Эксперименты проводятся для проверки обеих моделей в случае поворота к цели с одним вращением.  A. Кинематическая модель  Идея использования неголономной кинематики для описания траектории иглы гибкой иглы с коническим наконечником была продемонстрирована Webster et al. [6]. Подход предполагает, что кончик иглы следует круговой траектории. Они предложили использовать модель одноколесного велосипеда с рулевым ограничением для описания кругового пути иглы. Модель одноколесного велосипеда не могла описать траекторию иглы, когда вращение иглы выполнялось во время вставки. Это связано с тем, что круги, описывающие путь иглы до и после вращения иглы, не касаются друг друга (см. Рис.2 (а)]. Чтобы описать некасательный путь иглы, используется велосипедный метод. В этом исследовании представлена ​​модификация модели однодискового кинематики, которая учитывает некасательный путь иглы (см. Рис.2). Было замечено, что скошенная наконечник игла разрезает ткань под углом от центральной оси иглы [12], [21]. Обозначим этот угол как угол разреза β. Угол разреза моделируется путем размещения рамы на наконечнике иглы (Ψt), который поворачивается под углом разреза относительно центральной оси иглы (см. Рисунок 2 (b)]. Кончик иглы проходит через мягкую ткань в направлении, обозначенном xt. Вращение иглы вокруг ее центральной оси приводит к изменению направления xt [см. Рис.2 (с)]. Это заставляет кончик иглы следовать по пути, который не касается его пути перед вращением (см. Рис.2 (а)]. Кончик иглы следует по окружности окружности (центр с и радиус rt), как показано на фиг.2 (а). Кончик иглы лежит в начале рамы Ψt; выраженная в глобальной системе координат, становится равной o0 t = [xtip ytip ztip] T. Поскольку предполагается, что отклонение плоской иглы в плоскости x0 y0 принимается, ztip равно нулю. Уклонение отклонения иглы может быть выражено как функция х-координаты наконечника иглы  где c0 x и c0 y - x- и y-координаты центра окружности, выраженные в глобальной системе координат (Ψ0) соответственно. Координаты центра окружности c0, выраженные в глобальном кадре координат, вычисляются путем выполнения однородного преобразования  где ct - однородные координаты центра окружности, выраженные в кадре кончика  В (2) H0 t представляет собой однородное преобразование от кадрового координатного кадра к глобальной системе координат  Матрица вращения R0 t зависит от ориентации наконечника скоса (см. Рисунок 3). В случае направленной стороны скоса раму наконечника (Ψtu) необходимо поворачивать под углом разреза вокруг оси ztu, чтобы выровнять ее с центральной осью иглы  Если сторона скоса направлена вниз, сначала рама Ψtd должна вращаться вокруг оси ztd на угол разреза, затем поворот φ вокруг xtd  необходимо установить ось с центральной осью иглы  Наконец, необходимо выполнить поворот, равный наклону наконечника иглы θ вокруг оси z1, чтобы выровнять ось x1 с осью x0  Таким образом, для направленной вверх грани скоса R0 t в (4) вычисляется по формуле  и для грани скоса, указывающего вниз, это  Используя (2) - (9) положение иглы (xtip, ytip) и наклон иглы θ, центр круга ci + 1, который описывает следующий путь иглы, может быть определен в каждый момент во время вставки. Это позволяет прогнозировать будущий путь иглы, если нужно произвести поворот. Это необходимо для управления иглой, что будет обсуждаться в последующих разделах.  B. Механическая модель  Игла подвергается воздействию силы взаимодействия иглы и ткани, когда  он вводится в мягкую ткань (см. фиг.4 (а)]. Когда игла проходит через ткань, требуется сила, чтобы разрезать ткань и создать путь через ткань. Это моделируется силой при кончик иглы Ft. Если игла имеет асимметричный наконечник,  силы на кончике иглы имеют неравномерное распределение, что приводит к  иглу, чтобы отклоняться от прямого пути вставки [21]. В случае иглы с коническим наконечником, сила наконечника считается нормальной  к лицевой стороне. Когда игла проходит через ткань, трение действует на ось иглы. Это моделируется силой Ff действующий касательно оси иглы. Когда игла вставлена, она  поддерживается окружающей тканью. Сила, оказываемая ткань, окружающая иглу (то есть упругую опору), смоделирована как распределенная нагрузка (w (x)) вдоль вставленной части иглы.  Игла моделируется как консольный пучок (см. Рисунок 4 (b)]. Предполагая небольшие отклонения иглы, учитывается только поперечное отклонение иглы. Игла жесткая в осевом направлении, и, следовательно, укорочение иглы не рассматривается. Когда игла вставлена ​​без поворота, она имеет форму с одним изгибом (см. Рисунок 5 (a)]. Игла отклоняется из-за комбинации распределенной нагрузки и силы наконечника. Вращение иглы выполняется, когда расстояние вставки равно расстоянию вращения (xt = xr). Это приводит к изменению ориентации наконечника скоса, и, следовательно, сила наконечника также меняет направление (см. Рис.5 (b)]. Это заставляет иглу отклоняться в противоположном направлении. Для одного вращения это приводит к тому, что игла имеет форму с двойным изгибом. Чтобы смоделировать это, часть иглы перед вращением фиксируется рядом пружин. Учитывая достаточно малый весенний промежуток Δl, можно аппроксимировать упругий фундамент [33]. Жесткость такого эластичного фундамента K0 описывается с точки зрения жесткости на единицу длины и зависит от свойств иглы и ткани. Длина основания на рис.5 (b) равна xr - x0, что приводит к жесткости фундамента Kt  Для общего количества m пружин это приводит к жесткости пружины Ks Kt m. Распределенная нагрузка прикладывается к детали после вращения, что позволяет моделировать иглу, проходящую через множество изгибов. Чтобы оценить отклоненную форму иглы (v (x)) под действием распределенной нагрузки и силы наконечника, используется метод Рэлея-Ритца. Рэлеем-Ритц является вариационным методом, в котором равновесие системы устанавливается с использованием принципа минимальной потенциальной энергии [34]. Для механической системы полная потенциальная энергия выражается как  где U представляет собой энергию, которая хранится в системе, а W - работа, выполняемая в системе внешними силами. Чтобы найти отклоненную форму иглы с помощью метода Рэлея-Ритца, необходимо определить предполагаемую функцию смещения (формы). Были оценены несколько функций формы, и было обнаружено, что кубическая функция является подходящей функцией формы  Для сложных форм игл одна функция формы, как в (12), недостаточна для аппроксимации отклоненной формы иглы. Следовательно, игла разделена (см. Рисунок 4 (b)] на ряд элементов n, каждый из которых описывается их собственной функцией формы (vi (x))  Неизвестные коэффициенты a0, i, ..., a3, i определяются с помощью метода Рэлея-Ритца. Для первого игольчатого элемента (i = 1) xi-1 равно xb, а для последнего элемента (i = n) xi равно xt. Каждая из функций формы должна удовлетворять геометрическим граничным условиям системы. Поскольку игла закреплена у основания, наклон иглы θ (x) и отклонение v (x) равны нулю у основания  Кроме того, функции формы должны удовлетворять условиям непрерывности, что означает постоянное отклонение и уклон иглы на границах элементов  Для случая с одним изгибом (см. Рис.5 (а)] запасенная энергия равна энергии деформации из-за поперечного изгиба иглы (U = Ub). Используя теорию пучка Эйлера-Бернулли [35], энергия деформации, обусловленная поперечным изгибом Ub, оказывается равной  где E и I представляют собой модуль Юнга и второй момент инерции иглы соответственно. Игла цилиндрическая и EI постоянна вдоль длины иглы. Для иглы, проходящей множество изгибов, энергия также сохраняется в пружинах (см. Рис. 5 (b)]. Запомненная энергия представляет собой сумму энергии из-за изгиба иглы, как определено в (17), и энергии пружины для общего количества m пружин  где Ks представляет жесткость пружины, а v (xk) представляет собой величину отклонения для k-й пружины относительно конфигурации изгиба, как показано на фиг.5 (b). Работа, выполняемая в системе внешними силами, является суммой работы, выполняемой распределенной нагрузкой Wd и концентрированной нагрузкой наконечника Wc:  Работа, выполняемая распределенной нагрузкой, определяется  и работа, выполняемая концентрированной нагрузкой на наконечник, определяется  где v (xt) - отклонение на кончике иглы. Функции формы, определенные в (14), подставляются в уравнения для сохраненной энергии (см. (17) и (18)) и работают [см. (20) и (21)]. Это приводит к тому, что полная потенциальная энергия системы, определенная в (11), будет функцией функций формы, и, следовательно, неизвестные коэффициенты  Равновесие системы можно найти, взяв частную производную от полной потенциальной энергии по каждому из неизвестных коэффициентов функции формы  для k = 0, 1, 2, 3 и i = 1, ..., n. Неизвестные коэффициенты ak, i вычисляются путем решения системы уравнений, полученной в (23). Подстановка коэффициентов обратно в (13) и (14) дает форму отклоненной иглы. Экспериментальные данные используются для оценки параметров обеих моделей отклонения иглы. Этими параметрами являются радиус кривизны и угол разреза для модели на основе кинематики и распределенная нагрузка для модели на основе механики. В следующих разделах сначала вводится экспериментальная установка, а затем представлены эксперименты, которые используются для оценки параметров. При известных параметрах обе модели затем проверяются в серии (разомкнутых) рулевых экспериментов.  C. Экспериментальная установка  Экспериментальная установка, используемая для вставки игл в фантомы мягких тканей, показана на рисунке 6 [9]. Установки имеют две степени свободы: перевод вдоль и вращение вокруг оси ввода  для рулевого управления. Камера Sony XCDSX90 CCD FireWire (Sony Corporation, Токио, Япония) установлена ​​на 450 мм выше установки и используется для получения изображений. Для ультразвуковой визуализации используется Siemens ACUSON S2000 (Siemens Healthcare, Mountain View CA). Игла выполнена из нитиноловой проволоки (φ 0,5 мм). Нитинол представляет собой никель-титановый сплав, который в определенном температурном диапазоне обладает свойством быть сверхэластичным. Это означает, что игла может претерпевать очень большие упругие деформации без пластической деформации, позволяя ей вернуться к своей первоначальной (прямой) форме. Нитинол (E = 75 ГПа) также более гибок, чем сталь (E = 200 ГПа); это увеличивает отклонение и, следовательно, улучшает возможности рулевого управления иглой. Кончик иглы полируется до угла наклона α 30◦. Желатин используется как фантом мягкой ткани. Гелатин-фантомы получают путем смешивания желатинового порошка (Dr. Oetker, Bielefeld, Germany) с водой при температуре 40 ° С. Затем смесь помещают в пластиковый контейнер (170 × 30 × 200 мм3). Гель затвердевает через 5 ч при температуре 7 ° С. Для смеси желатин-вода (по весу) 14,9% эластичность оказалась равной 35,5 кПа. Эта эластичность подобна той, что содержится в ткани молочной железы [36]. Эластичность определяют в одноосном испытании на сжатие с использованием Anton Paar Physica MCR501 (Anton Paar GmbH, Грац, Австрия). van Veen et al. [8] исследовали влияние нескольких параметров системы на отклонение иглы, в том числе фантомную эластичность мягких тканей. Каждая вставка иглы выполняется в новом месте фантома мягкой ткани, чтобы избежать влияния предыдущих вставок на текущий эксперимент. |