

А.В. Гладков, НГМА
Ю.Н. Данилова, ГДКБ
И.И. Строков, МЕДТЕХ

Полуавтоматический анализ параметров позвоночника с помощью комплекса КАРС

Из преимуществ цифровой рентгенографии отмечается, прежде всего, удобство, скорость получения снимков и малая доза облучения. Кроме того, современные цифровые аппараты часто превосходят плёночные по диагностической ценности. Например, аппарат КАРС-П, производства ООО предприятия «МЕДТЕХ», обеспечивает контрастную чувствительность 1.0% и пространственное разрешение 5 п.л./мм. Этой точности достаточно для описания большинства видов костной патологии.

В сравнении со снимками мягких тканей, процесс описания костных структур включает получение количественных параметров, таких как углы, расстояния, площади и т.д. Возможность построения геометрических объектов непосредственно на изображении с помощью мыши компьютера облегчает измерения, но этого не достаточно для таких сложных случаев, как снимки позвоночника (спондилограммы). Форма и пространственная ориентация позвоночника, в положении пациента стоя, является интегральным показателем его анатомо-функциональной состоятельности. Для объективной оценки этого показателя используются десятки и сотни параметров, относящихся как к отдельным позвонкам, так и их группам, включая стандартные дуги, межпозвонковые углы и т.д. Таким образом, расчёт полного набора параметров для позвоночника весьма трудоёмок, и его очень сложно выполнить вручную.

В задаче описания формы и ориентации позвоночника по спондилограмме можно выделить три части: задание координат позвонков; расчёт установленного набора параметров; наконец, составление на его основе формализованного описания. Методы для решения каждой из этих подзадач, в принципе, известны. Так, координа-

ты позвонков можно задать вручную или найти программным путём. Как правило, совмещаются оба способа. Для поиска контуров позвонка может использоваться обобщённая модель его формы, учитывающая, как меняется яркость точек изображения поперёк краёв позвонка [1]. Построение модели требует участия эксперта для составления коллекции правильно обведённых позвонков. Как правило, чем больше её размер, тем лучше последующие предсказания.

Следующая задача, вычисление параметров, может считаться тривиальной, если известно их формализованное определение. Трудность заключается в самом составлении и классификации определений, выполнении экспертом в области ортопедии. Подобным же образом, опыт врача в описании спондилограмм должен быть формализован, то есть переведен в систему логических выражений.

Цель настоящей работы состояла в решении каждой из трёх задач в рамках единой системы, которая бы позволила при минимальных затратах труда и времени врача получать исчерпывающее и объективное описание снимков позвоночника в прямой и боковой проекциях.

Программы расчетов встроены специалистами ООО предприятия «МЕДТЕХ» как программные модули в программу «МЕДАРМ», созданную в ООО предприятия «МЕДТЕХ» и показавшую себя эргономичной и удобной для докторов.

1. Поиск контуров позвонков

На данном этапе нашей работы контур тела каждого позвонка в двух проекциях описывался четырьмя точками в его углах. Это приближенное представление, достаточное, однако,

для вычисления основных клинически значимых параметров позвоночника. Поиск контуров происходит в полуавтоматическом режиме, по шагам, когда пользователь может на любом шаге проверить предложения компьютера по размещению контуров и, если нужно, поправить их.

Процесс начинается с обвода вручную тела любого одного позвонка. Он служит программе «затравкой» для поиска остальных. На первом шаге программа находит среди уже известных позвонков на других снимках контур, наиболее похожий на затравку. При этом учитывается как различие формы контура, так и распределение яркости точек поперёк него. Отличие нашего подхода от других известных в том, что базой поиска являются сами исходные снимки и контуры, а не их обобщённая модель. Преимущество в том, что такая база расширяется сама, по мере описания новых снимков. При этом так же растёт вероятность найти снимок, детально похожий на искомый. Такой результат не только повышает точность предсказания, но и полезен сам по себе, будучи ссылкой на «прецедент»: случай, очень похожий на описываемый.

Далее, задача программы – предположить положение позвонков в текущем снимке, опираясь на похожий снимок с уже построенными контурами (образец). Вначале контур-затравка и отвечающий ему контур-образец максимально совмещаются операциями масштабирования, поворота и сдвига. Кроме того, происходит выравнивание яркости и контраста в области контуров. Таким образом, нивелируются различия снимков, связанные с режимом экспозиции и положением пациента относительно детектора. После этого, один из контуров в снимке образца, соседний

к найденному, проецируется на текущий снимок. Допускается небольшое искажение проекции с тем, чтобы получить наилучшее соответствие распределений яркости около контуров в сравниваемых снимках. Такое искажение бывает двух типов. Плавный сдвиг применяется, если он заведомо улучшает соответствие. В спорных случаях работает поиск наугад: в его ходе испытываются случайные положения точек в окрестности проекции, из которых выбираются сочетания с наилучшей оценкой. Для новых положений точек окрестность сужается, пока не появится возможность сделать плавный сдвиг.

После того, как новый контур построен программой, пользователь может поправить положение его точек и инициировать поиск следующего. Программа возвращается к поиску

наиболее похожего снимка, учитывая на этот раз оба известных контура. Не исключено, что для следующего шага будет выбран уже другой образец, но дальше, скорее всего, образец меняться не будет.

Пошаговая тактика не намного замедляет процесс, но делает его более гибким. Так, можно начать с любого позвонка, продолжить построение в любую сторону, не отмечая плохо видимые позвонки, и т.п. При сохранении снимка с отмеченными позвонками он пополняет коллекцию образцов.

2. Определение и вычисление набора параметров

Методика, использованная в настоящей работе, была разработана нами ранее для кинематического анализа спондилограмм [2]. Она

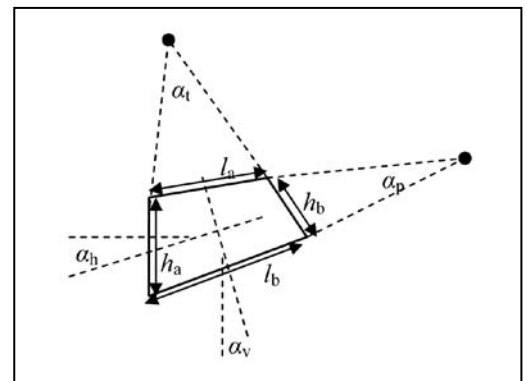
позволяет рассчитать ряд унифицированных показателей формы и пространственного положения позвонка, как в исходном положении, так и после выполнения различных видов движения, и сравнить полученные результаты. В её основе лежит набор параметров, вычисляемых отдельно для сагиттальной и фронтальной проекций снимка, если не оговорено иначе (табл. 1).

Третья группа параметров рассчитывается для стандартных дуг (C_2-C_7 , Th_1-Th_5 , Th_1-Th_9 , Th_1-Th_{12} , Th_5-Th_9 , Th_5-Th_{12} , D_9-D_{12} , L_1-L_5 , Th_1-L_5), и произвольных, задаваемых пользователем. Для снимка в прямой проекции полезна функция автоматического поиска дуг по изменению межпозвоноковых углов, определение первичной и компенсаторных сколиотических дуг.

Таблица 1. Параметры формы и положения позвонка

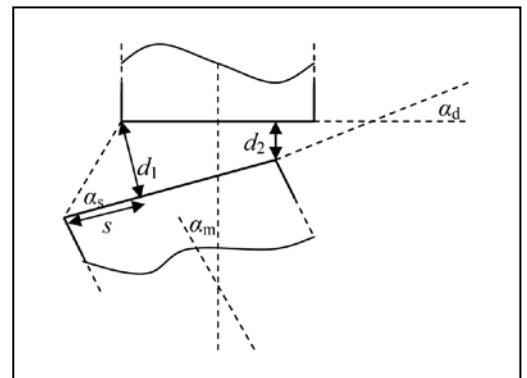
1. Параметры тел позвонков:

- 1.1. Высота вентрального h_a и дорсального h_b (в сагиттальной плоскости) или левого и правого контура тела позвонка (во фронтальной плоскости).
- 1.2. Длина покровной l_a и базальной l_b замыкательной пластики.
- 1.3. Угол клиновидности α_p и трапецевидности α_t тела позвонка.
- 1.4. Угол наклона тела позвонка к вертикали α_v и горизонтали α_h .



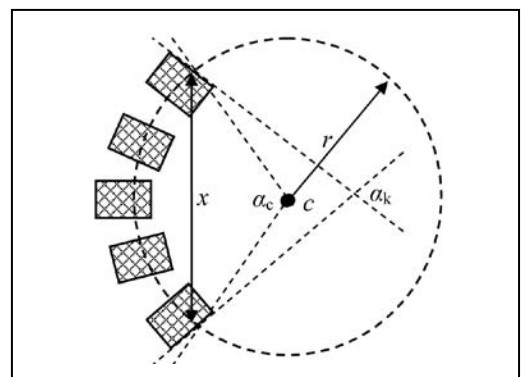
2. Параметры межпозвоноковых сочленений:

- 2.1. Высота вентрального d_1 и дорсального d_2 (в сагиттальной плоскости) или левого и правого отдела межпозвонокового диска (во фронтальной плоскости).
- 2.2. Угол клиновидности α_d межпозвонокового диска.
- 2.3. Угол α_m между телами позвонков.
- 2.4. Линейное смещение s тела позвонка в плоскости диска.
- 2.5. Угол α_s смещения позвонка (только в сагиттальной плоскости).



3. Параметры непрерывных дуг:

- 3.1. Центральный угол α_c .
- 3.2. Угол Кобба α_k .
- 3.3. Радиус r .
- 3.4. Длина ρ .
- 3.5. Вершина c .
- 3.6. Длина x хорды.
- 3.7. Угол наклона α_x хорды к вертикали.
- 3.8. Ошибка аппроксимации ϵ дуги окружностью.



3. Составление описания по набору параметров

Координаты позвонков и их параметры могут быть выданы в отдельный документ как приложение к снимку, или для использования в других программах. В то же время, диагностический смысл имеют не сами величины параметров, а то, укладываются ли они в границы нормы или различной степени патологии. Иными словами, нужно перейти от величин к качественным утверждениям. Для этого в программе используется своего рода «электронный справочник» по параметрам позвоночника. Это набор из примерно 300 определений двух типов. В первом связывается диапазон величин параметра с кодом патологии, например:

Номер определения: 2

Параметр: центральный угол дуги Th_1-Th_5 .

Диапазон: от 25 до 40°.

Код патологии: «Кифоз верхнегрудного отдела позвоночника усилен 1 ст.»

Определение второго типа представляет логические операции с утверждениями первого типа, например:

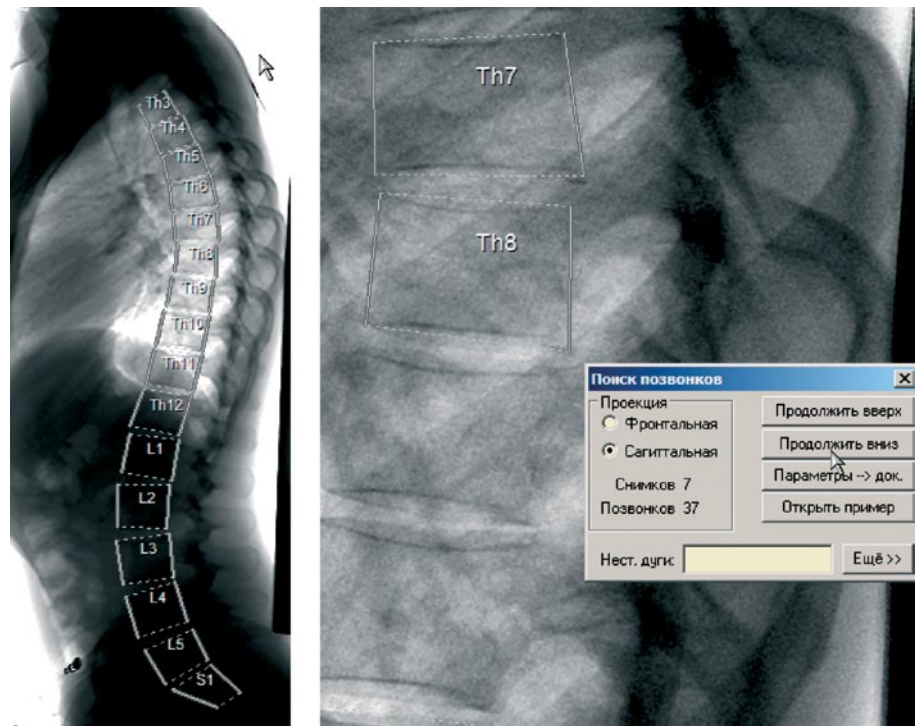
Если верно («1» или «2» или «3» или «5» или «6» или «8») и «23» и «30», то «Форма и пространственная ориентация позвоночника характерна для деформации при болезни Бехтерева.»

Перечень утверждений, получаемый программой при решении данных логических выражений, представляет исчерпывающий список отклонений от нормы, которые могут быть установлены на основании рассматриваемой спондилограммы. Врач может использовать эти данные для более содержательных выводов или для направления к узкому специалисту. Таким образом, программа берёт на себя наиболее трудоёмкие рутинные операции: оконтуривание, вычисление и пользование электронным справочником.

4. Клинический пример

Рассмотрим снимок позвоночника пациента Д. в сагиттальной проекции (рис. 1 А). Построим контуры позвонков, начиная, например, с седьмого грудного позвонка. Для этого увеличим соседний участок снимка и обведём вручную позвонок, затем

Рисунок 1. Построение контуров тел позвонков на снимке позвоночника.



А. Снимок с отмеченными контурами тел позвонков.

Б. Начало (на Th7) и продолжение выделения контуров.

Параметры позвонков:						
Название	Высота спереди	Высота сзади	Длина сверху	Длина снизу	Угол трапец.	Угол клинов.
Th3	17.2	20.6	22.8	24.3	3.6	-7.8
Th4	19.7	21.9	25.5	26.8	3.1	-4.5
Th5	20.0	22.4	27.6	30.7	8.3	-4.6
Th6	18.6	23.6	30.8	33.3	6.7	-9.0
Th7	20.0	21.7	28.8	31.6	7.4	-2.9
Th8	20.2	22.1	28.9	31.1	5.7	-3.4
Th9	21.8	23.2	30.2	31.6	3.6	-2.6
Th10	24.9	26.5	33.9	34.3	1.2	-2.6
Th11	26.0	28.4	35.1	33.8	-2.0	-3.9
Th12	27.0	30.1	33.7	35.8	4.7	-5.4
L1	28.6	30.7	37.0	37.3	0.8	-3.4
L2	30.4	32.1	37.8	37.0	-1.3	-2.5
L3	32.7	32.3	40.1	36.9	-5.6	0.6
L4	31.2	29.9	38.7	38.6	-0.1	1.9
L5	29.1	24.5	38.5	35.9	-5.2	7.0
S1	17.0	27.4	49.9	49.3	-15.7	-13.9

изменим его название на «Th7». Дальнейшее построение происходит с помощью окна «Поиск позвонков» (рис. 1 Б). В данном случае выбрана команда «Продолжить вниз».

С помощью таких команд можно достаточно быстро (1–2 минуты) отметить видимые контуры позвонков, при том, что S₁ и Th₃ обведены вручную, поскольку в коллекции снимков их не нашлось. В качестве образца всё время выступал один и тот же снимок (пациент С. со схожим строением позвоночника). Эти сведения отражаются в «рабочем журнале» программы, кроме того, референтный снимок можно в любой момент открыть для сравнения по кнопке «Открыть пример». По кнопке «Параметры → документ» выдаётся набор данных в формате XML, который можно напрямую читать во многих современных программах. По умолчанию он раскрывается в таблицы параметров для позвонков, дисков и дуг (все углы указаны в градусах, длины – в миллиметрах).

Таблицы служат приложением к описанию снимка. Основа описания составляется программой по правилам, приведённым выше:

«Грудной отдел позвоночника отклонен вперёд. Тело L5 позвонка отклонено кпереди 2 ст. Положение крестца стремится к вертикали. Высота вентрального отдела L5–S1 диска снижена. Гиперлордоз на уровне L5-S1 диска. Угловой лордоз на уровне Th12-L1 диска. Угловой лордоз на уровне L1-L2 диска.»

В этом тексте пропущены все утверждения, относящиеся к норме, например «Лордоз поясничного отдела позвоночника не изменён», но по желанию пользователя они могут быть включены.

5. Обсуждение и планы

Описание снимков костных систем, даже в цифровом варианте, часто остаётся трудоёмким процессом, включающим большой объём рутинных действий, вычислений и обращения к справочной документации. Методы автоматизации для случая спондилограм, встроенные в программу «МЕДАРМ» созданную ООО предприятием «МЕДТЕХ», являются только первым шагом в сторону повышения удобства и качества рентгенографических исследований. Главные преимущества данной ме-

Параметры дисков:							
Название	Высота спереди	Высота сзади	Угол клинов.	Наклон	Угол межпозв.	Смещение	Угол смещения
Th3-Th4	2.2	1.4	-1.9	-21.9	6.3	-1.9	107.0
Th4-Th5	2.1	2.1	-0.1	-18.3	7.4	-1.8	114.9
Th5-Th6	1.8	1.4	-0.7	-14.1	6.4	-0.7	107.5
Th6-Th7	1.8	3.3	2.9	-4.1	5.9	2.2	143.7
Th7-Th8	2.8	4.6	3.6	2.2	7.1	2.0	109.9
Th8-Th9	3.8	3.3	-0.9	6.9	4.6	2.3	68.6
Th9-Th10	4.3	2.5	-3.3	7.4	4.7	-0.3	64.4
Th10-Th11	3.2	2.4	-1.3	7.7	4.2	-0.7	88.2
Th11-Th12	4.7	2.9	-3.1	9.4	-0.4	0.9	77.2
Th12-L1	7.0	2.6	-7.0	9.7	-5.3	-0.6	82.3
L1-L2	10.0	3.8	-9.9	4.6	-8.4	0.8	76.2
L2-L3	9.4	3.6	-9.0	-2.4	-9.6	-1.4	77.2
L3-L4	9.4	3.4	-9.4	-12.2	-10.1	-0.9	81.6
L4-L5	10.5	7.1	-5.2	-21.3	-12.7	-0.8	94.1
L5-S1	6.0	4.6	-2.5	-32.1	-28.3	0.2	101.7

Параметры дуг:						
Дуга	Радиус	Угол дуги	Угол Кобба	Длина хорды	Угол хорды	Длина дуги
Th5-Th9	171.0	37.1	21.6	109.3	-1.6	112.4
Th9-Th12	596.1	10.8	9.1	112.2	164.8	112.6
Th5-Th12	270.6	42.5	30.7	197.4	6.7	203.2
L1-L5	210.8	-52.2	43.7	185.3	-8.3	192.1

тодики: скорость и объективность; надёжная диагностика основных видов геометрической патологии позвоночника.

Развитие работы видится в переходе от проекций к пространственной модели позвоночника, на которой можно будет получать как более полную диагностику, так и прогнозировать действие оперативного или другого лечения. Другая возможность – распространить похожую методику на другие виды снимков костей.

Литература

1. Paul P. Smyth, Christopher J. Taylor, Judith E. Adams. *Vertebral Shape: Automatic Measurement with Active Shape Model. Radiology, May 1999, 571–578.*

2. Гладков А. В., Фроловский В. Д. *Формализация медицинской информации в вертебрологии. Тезисы Международной конференции «Информационные системы и технологии», Новосибирск 2003, том 3, 27–30.*