

DOI:10.16781/j.0258-879x.2021.08.0907

• 综述 •

## 双平面透视成像系统及其在膝关节生物力学研究中的应用进展

周天平, 徐一宏, 徐卫东\*

海军军医大学(第二军医大学)长海医院关节骨病外科, 上海 200433

**[摘要]** 双平面透视成像系统(DFIS)经过近20年的完善与发展, 目前已成为一项较成熟的生物力学研究技术。本文回顾相关文献, 对DFIS的发展历史和主要结构功能进行了介绍。DFIS所具有的无创性、精确性和动态性观测的优点, 使其在膝关节生物力学研究中得到广泛应用, 本文也对DFIS在正常膝关节及膝关节术后生物力学研究中的应用进展进行了总结, 并展望了未来可能的研究方向。

**[关键词]** 双平面荧光透视成像系统; 膝关节; 生物力学; 前交叉韧带; 膝关节置换成形术

**[中图分类号]** R 445; R 684 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2021)08-0907-04

### Dual fluoroscopic imaging system and its application in biomechanical study of knee joint: recent advance

ZHOU Tian-ping, XU Yi-hong, XU Wei-dong\*

Department of Orthopaedics, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

**[Abstract]** With nearly 20 years of improvement and development, dual fluoroscopic imaging system (DFIS) has become a proven technique for biomechanical study. This paper reviews the relevant literature and introduces the development history, main structure and function of DFIS. DFIS has been widely used in biomechanical study of knee joint with the advantages of non-invasive, precision and dynamic observation. Therefore, this paper also summarizes the application progress of DFIS in normal knee joint and knee joint postoperative biomechanical research, and looks forward to the possible research direction in the future.

**[Key words]** dual fluoroscopic imaging system; knee joint; biomechanics; anterior cruciate ligament; knee replacement arthroplasty

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2021, 42(8): 907-910]

膝关节是人体结构和功能活动较为复杂的关节之一, 其骨性结构及半月板、关节囊、交叉韧带、副韧带等附属结构共同维持着它的静态和动态稳定性。膝关节的运动是包括屈伸运动、滚动、滑动、侧方移位和轴位旋转运动在内的复合运动<sup>[1]</sup>, 承担了人体下肢运动的主要功能。研究表明膝关节功能和结构的损伤往往伴随膝关节正常生物力学结构的改变<sup>[2]</sup>。因此, 膝关节相关的生物力学研究对预防膝关节运动损伤、确定相关手术方案、制订术后康复策略及下肢正常运动功能的恢复有着重要意义。

双平面透视成像系统(dual fluoroscopic imaging system, DFIS)是一种基于三维建模和X线透视的新型生物力学研究工具, 对确定人体骨骼及其附

属结构在三维空间的相对位置和运动具有重要意义<sup>[3]</sup>。该系统克服了传统CT、MRI三维建模只能观察静态结构的局限性和三维步态分析易受肌肉皮肤相对位移影响的缺陷, 极大地提高了对膝关节动态运动观察的精确度<sup>[4]</sup>。因此, 本文总结了DFIS在膝关节生物力学研究中的应用现状, 以给未来研究提供借鉴。

### 1 DFIS的发展历史

21世纪初, 基于CT和MRI的三维重建技术、三维步态分析技术、单平面成像技术及双平面成像技术等已经广泛应用于膝关节的生物力学研究<sup>[5]</sup>。但是, CT和MRI的成像特点决定了它们

[收稿日期] 2020-05-28

[接受日期] 2020-09-27

[基金项目] 上海市体育科技“备战攻关”项目(20J017). Supported by Shanghai Sports Science and Technology “Tackling Key Problem” Project (20J017).

[作者简介] 周天平, 硕士生. E-mail: tianpingzhou14@163.com

\*通信作者( Corresponding author). Tel: 021-31161683, E-mail: xuwdshanghai@126.com

只能进行静态的三维重建,不能对关节运动过程进行连续观察。三维步态分析系统的标记点粘贴于皮肤表面,在运动过程中易受皮肤相对位移的影响,从而造成较大的运动学测量误差<sup>[6]</sup>。单平面成像技术在垂直于成像方向上会产生较大的测量误差。鉴于此,学者们提出并改进了通过将膝关节运动过程中2个不同方向上的二维投影与关节三维模型匹配,来确定膝关节三维运动状态的DFIS<sup>[7-10]</sup>。该系统不仅能动态展示膝关节的运动状态,而且表现出较高的测量精确度。

2001年,Asano等<sup>[10]</sup>通过CT扫描建立膝关节的三维模型,而后将 $0^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 之间每隔 $15^{\circ}$ 时膝关节在前后位和侧位X线透视下的投影与三维模型进行人工匹配,并测量了不同屈曲角度下膝关节的6自由度数据。经过多次重复,他们的测量标准误差约为0.4 mm和 $0.4^{\circ}$ 。虽然Asano等<sup>[10]</sup>并没有实现动态测量,且测量误差仍然较高,但他们完成了膝关节弯曲过程中不同状态下6自由度生物力学指标的精确测量,实现了DFIS的初步探索。而后,来自美国赫里克戴维斯运动分析实验室(Herrick-Davis Motion Analysis Laboratory)的You等<sup>[8]</sup>试制出了一种高速双平面摄像系统并实现了对试验犬的动态观察,其测量的精确度达到0.8 mm和 $2.5^{\circ}$ 。后来,Li等<sup>[11]</sup>利用DFIS观察了3例健康受试者在 $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 和 $120^{\circ}$ 负重、屈膝状态下膝关节胫股骨接触点位置和胫骨平台旋转变化的变化,经过验证后其精确度达到0.1 mm和 $0.1^{\circ}$ 。至此,DFIS逐渐走向成熟。

## 2 DFIS的结构功能

DFIS主要由透视影像采集系统和数据解析系统两大部分组成<sup>[12]</sup>。透视影像采集系统由2组相对应的X线发射器和图像接收器及与之配套的高速摄像机组成。目前常用的DFIS X线发射器的发射频率可达250 Hz,高速摄像机的采样频率甚至可达1 000 Hz,这极大地保证了动态采样的连续性<sup>[13]</sup>。但是,为了保证测量的精确性,高速摄像机的每次曝光时间仅为 $1/2\ 000\text{ s}$ ,即使人体骨骼系统处于2 m/s的高速移动测量误差仍然不超过1 mm<sup>[14]</sup>。由于图像接收器的直径仅为30 cm,因此该系统的测量空间范围直径最大为30 cm,可以将人体关节在此空间范围运动过程中2个不同方向上的动态X线投影拍摄并存储下来<sup>[15]</sup>。数据解析系统是包括三维建模系统、2D-3D影像匹配系统及数据测量系统在内的一系列处理软件。常用的三维

建模软件有Mimics(比利时Materialise公司)和Amira(美国Thermo Fisher Scientific公司)等,这些软件可以实现基于CT、MRI数据的膝关节三维建模。2D-3D影像匹配系统和数据测量系统可以实现2D影像与3D模型之间的精确匹配,并能对膝关节运动过程中各部分的6自由度数据进行精确测量。

## 3 DFIS在膝关节生物力学研究中的应用

3.1 膝关节测量解剖坐标系的建立 膝关节测量坐标系的建立是用DFIS进行膝关节6自由度分析的基础,其中最常用且简单的一种便是基于胫骨平台的膝关节坐标系。在此坐标系下,内外侧胫骨平台近似为2个圆形,2个圆心连线代表内外侧轴方向。胫骨长轴代表上下方向,前后轴为垂直于内外侧轴和胫骨长轴所组成的平面。胫骨长轴和股骨长轴之间的角度为膝关节在运动过程中的屈伸角度<sup>[16]</sup>。为了测量股骨内外侧髁的运动,引入了几何中心轴的概念。股骨内外侧髁被近似为2个共轴圆柱体,圆柱体的几何中心代表内外侧髁的中心点,用于确定内外侧髁的位移。圆柱体的共轴即所谓的几何中心轴与内外侧轴之间的夹角用来表示内外侧髁的旋转运动<sup>[17]</sup>。

3.2 DFIS在正常膝关节生物力学研究中的应用 作为一种全新的生物力学研究系统,DFIS在正常膝关节生物力学研究中取得了重要进展。Rao等<sup>[16]</sup>运用DFIS对膝关节负重屈膝过程中股骨髁的运动和交叉韧带的张力变化进行了深入研究。他们发现在膝关节屈曲 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,前交叉韧带和后交叉韧带后内侧束的张力逐渐下降,同时伴有股骨内侧髁前移和股骨外侧髁后移。而在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,前后交叉韧带都处于低张力状态,同时内侧髁在 $60^{\circ}$ 之前继续前移而在 $60^{\circ}$ 之后开始后移。最后当膝关节屈曲到 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 时,后交叉韧带张力开始增加,同时股骨内外侧髁后移。这一结果对于理解膝关节负重屈膝运动过程中的平衡功能具有重要意义。此外,Uzuner等<sup>[15]</sup>运用DFIS对膝关节负重站立过程中关节软骨的变化进行了观察,发现胫骨与股骨间存在0.23 mm的纵向位移,同时伴随着少量前后和内外侧位移,这说明DFIS在显示膝关节软组织精细形变中有巨大优势。

3.3 DFIS在前交叉韧带相关研究中的应用 近年来,DFIS开始被广泛应用于前交叉韧带相关的生物力学研究<sup>[17]</sup>。Wu等<sup>[18]</sup>通过对8名健康受试者在步态周期支撑相过程中前交叉韧带的长度和方向变化进行研究,发现在支撑相40%~60%阶段,

前交叉韧带前内侧束(伸展比例为 $12\% \pm 7\%$ )和后外侧束(伸展比例为 $13\% \pm 15\%$ )皆处于最大伸长状态,且随着膝关节的屈曲,前内侧束和后外侧束在矢状面和冠状面上的倾斜角度减小,而在水平面上的偏移角度增大。因此他们认为膝关节前交叉韧带的前内侧束和后外侧束在运动过程中是不等长的,且前内侧束和后外侧束的长度变化模式一致。但有趣的是,这一结果与传统认为的前内侧束在膝关节伸直时紧张而后外侧束在膝关节屈曲时紧张的观点并不一致,因此仍需进一步的生物力学研究来明确。此外, Hosseini 等<sup>[19]</sup>借助 DFIS 对人体膝关节负重屈膝状态下的张力变化进行了定量评估,发现当膝关节屈曲 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 时,加载在前交叉韧带上的张力分别为( $131.4 \pm 16.8$ )、( $106.7 \pm 11.2$ )和( $34.6 \pm 4.5$ ) N,这一结果对进一步研究前交叉韧带的损伤机制有重要意义。

此外,前交叉韧带缺乏患者膝关节的生物力学状况也受到广泛关注<sup>[20]</sup>。Van de Velde 等<sup>[21]</sup>通过 DFIS 对前交叉韧带断裂患者的双侧膝关节进行了对比研究发现,在前交叉韧带断裂的膝关节中,胫骨平台软骨接触区域向后外侧移位,且接触区面积更小、软骨厚度更薄、软骨形变更大,这些因素都加剧了膝关节的退变。Chen 等<sup>[22]</sup>在对前交叉韧带损伤患者步态周期支撑相膝关节稳定性的研究中发现,在站立相 20% 阶段,前交叉韧带损伤侧膝关节表现出更大的胫骨前移[损伤侧:( $2.5 \pm 4.9$ ) mm;健康侧:( $-0.1 \pm 2.9$ ) mm],该研究进一步证实前交叉韧带在维持膝关节稳定性中的重要作用。

### 3.4 DFIS 在膝关节置换相关研究中的应用

一直以来,膝关节置换相关生物力学研究都是 DFIS 应用的重要领域<sup>[23]</sup>。近年来,DFIS 被广泛应用于膝关节置换术后生物力学功能的评估<sup>[24-25]</sup>。Wang 等<sup>[26]</sup>通过对 9 例后交叉韧带保留型假体全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)后 8 个月的研究发现,TKA 术后患者膝关节的股骨后髁偏距变大[术前( $28.5 \pm 4.5$ ) mm、术后( $31.1 \pm 5.1$ ) mm,  $P < 0.05$ ],且股骨后髁偏距增大与术后膝关节最大屈曲角度减小相关( $r = 0.74$ )。因此他们认为 TKA 术后增大的股骨后髁偏距是造成膝关节屈曲角度减小的主要原因,且这一观点得到了众多研究者的支持。此外,DFIS 还被广泛应用于新型的双交叉韧带保留型假体的功能评估。Tsai 等<sup>[27]</sup>通过对 30 例双交叉韧带保留型假体全膝关节置换术后患者进行双平面成像评估发现,尽管重建侧膝关节与健康膝关节在支撑相胫骨前后位移、内外翻等运

动力学特征方面差异并没有统计学意义,但是在步态中双交叉韧带保留型假体全膝关节置换术后患者的矢状面运动和包括旋转模式在内的胫股关节接触特征并没有完全恢复,这表明双交叉韧带保留型假体全膝关节置换术并不能恢复胫股关节接触的固有运动学。因此,新型假体的设计还有待进一步探索。

## 4 小结

DFIS 目前已经成为一种成熟的生物力学研究手段,该系统主要由透视成像系统和与之配套的图像分析处理系统组成。经过验证,该系统具有非侵袭性、连续动态观察、测量精确度高等优点,特别适用于膝关节等的生物力学研究<sup>[28]</sup>。目前 DFIS 在正常膝关节的生物力学特点观察、前交叉韧带正常生物力学研究和前交叉韧带缺失后膝关节的生物力学特点研究,以及全膝关节置换术后膝关节生物力学功能评估等一系列研究中取得了重要进展<sup>[29]</sup>。但是,该系统在前交叉韧带重建术后膝关节生物力学功能评估、半月板损伤及修复研究、骨关节炎发生发展机制研究等领域较少报道<sup>[30]</sup>,因此 DFIS 在这些领域中的应用或许会成为未来的重要探索和研究方向。

## 【参考文献】

- [1] VAIENTI E, SCITA G, CECCARELLI F, POGLIACOMI F. Understanding the human knee and its relationship to total knee replacement[J]. *Acta Biomed*, 2017, 88: 6-16.
- [2] HUNT M A, CHARLTON J M, ESCULIER J F. Osteoarthritis year in review 2019: mechanics[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2020, 28: 267-274.
- [3] LANSDOWN D A, MA C B. Clinical utility of advanced imaging of the knee[J]. *J Orthop Res*, 2020, 38: 473-482.
- [4] GUAN S, GRAY H A, KEYNEJAD F, PANDY M G. Mobile biplane X-ray imaging system for measuring 3D dynamic joint motion during overground gait[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2016, 35: 326-336.
- [5] KIJOWSKI R, DEMEHRI S, ROEMER F, GUERMAZI A. Osteoarthritis year in review 2019: imaging[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2020, 28: 285-295.
- [6] LITRELL M E, CHANG Y H, SELGRADE B P. Development and assessment of a low-cost clinical gait analysis system[J]. *J Appl Biomech*, 2018: 1-19.
- [7] BENNY J, MCCARTIN B, PACK L, MORSE P, ATKINSON P J. The use of Roentgenstereofluorogrammetry to predict the 3-D spatial coordinates of points in low speed events[J]. *J Biomech*, 2002, 35: 1003-1006.
- [8] YOU B M, SIY P, ANDERST W, TASHMAN S. *In vivo* measurement of 3-D skeletal kinematics from sequences of biplane radiographs: application to knee kinematics[J].

- IEEE Trans Med Imaging, 2001, 20: 514-525.
- [9] LI G, DEFRATE L E, PARK S E, GILL T J, RUBASH H E. *In vivo* articular cartilage contact kinematics of the knee: an investigation using dual-orthogonal fluoroscopy and magnetic resonance image-based computer models[J]. Am J Sports Med, 2005, 33: 102-107.
- [10] ASANO T, AKAGI M, TANAKA K, TAMURA J, NAKAMURA T. *In vivo* three-dimensional knee kinematics using a biplanar image-matching technique[J]. Clin Orthop Relat Res, 2001: 157-166.
- [11] LI G, WUERZ T H, DEFRATE L E. Feasibility of using orthogonal fluoroscopic images to measure *in vivo* joint kinematics[J]. J Biomech Eng, 2004, 126: 314-318.
- [12] PENG Y, ARAUZ P, KWON Y M. Gender-specific difference of *in-vivo* kinematics in patients with unilateral total hip arthroplasty[J]. Hip Int, 2021, 31: 34-42.
- [13] HENNESSY D, ARAUZ P, KLEMT C, AN S, KWON Y M. Gender influences gait asymmetry following bicruciate-retaining total knee arthroplasty[J]. J Knee Surg, 2020, 33: 582-588.
- [14] LI J S, TSAI T Y, CLANCY M M, LI G, LEWIS C L, FELSON D T. Weight loss changed gait kinematics in individuals with obesity and knee pain[J]. Gait Posture, 2019, 68: 461-465.
- [15] UZUNER S, RODRIGUEZ M L, LI L, KUCUK S. Dual fluoroscopic evaluation of human tibiofemoral joint kinematics during a prolonged standing: a pilot study[J]. Eng Sci Technol, 2019, 22: 794-800.
- [16] RAO Z, ZHOU C, KERNKAMP W A, FOSTER T E, BEDAIR H S, LI G. *In vivo* kinematics and ligamentous function of the knee during weight-bearing flexion: an investigation on mid-range flexion of the knee[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28: 797-805.
- [17] LI G A, LI J S, TORRIANI M, HOSSEINI A. Short-term contact kinematic changes and longer-term biochemical changes in the cartilage after ACL reconstruction: a pilot study[J]. Ann Biomed Eng, 2018, 46: 1797-1805.
- [18] WU J L, HOSSEINI A, KOZANEK M, GADIKOTA H R, GILL T J, LI G. Kinematics of the anterior cruciate ligament during gait[J]. Am J Sports Med, 2010, 38: 1475-1482.
- [19] HOSSEINI A, GILL T J, VAN DE VELDE S K, LI G. Estimation of *in vivo* ACL force changes in response to increased weightbearing[J/OL]. J Biomech Eng, 2011, 133: 051004. DOI: 10.1115/1.4003780.
- [20] LIN Z P, TANG Y Y, TAN H C, CAI D Z. Patellofemoral kinematic characteristics in anterior cruciate ligament deficiency and reconstruction[J/OL]. BMC Musculoskeletal Disord, 2019, 20: 82. DOI: 10.1186/s12891-019-2456-9.
- [21] VAN DE VELDE S K, BINGHAM J T, HOSSEINI A, KOZANEK M, DEFRATE L E, GILL T J, et al. Increased tibiofemoral cartilage contact deformation in patients with anterior cruciate ligament deficiency[J]. Arthritis Rheum, 2009, 60: 3693-3702.
- [22] CHEN C H, LI J S, HOSSEINI A, GADIKOTA H R, GILL T J, LI G. Anteroposterior stability of the knee during the stance phase of gait after anterior cruciate ligament deficiency[J]. Gait Posture, 2012, 35: 467-471.
- [23] ARAUZ P, KLEMT C, LIMMAHAKHUN S, AN S, KWON Y M. Stair climbing and high knee flexion activities in Bi-cruciate retaining total knee arthroplasty: *in vivo* kinematics and articular contact analysis[J]. J Arthroplasty, 2019, 34: 570-576.
- [24] KLEMT C, DRAGO J, OGANESYAN R, SMITH E J, YEO I, KWON Y M. Gait and knee flexion *in vivo* kinematics of asymmetric tibial polyethylene geometry cruciate retaining total knee arthroplasty[J/OL]. J Knee Surg, 2020. DOI: 10.1055/s-0040-1718681.
- [25] KLEMT C, DRAGO J, TIRUMALA V, KWON Y M. Asymmetrical tibial polyethylene geometry-cruciate retaining total knee arthroplasty does not fully restore *in-vivo* articular contact kinematics during strenuous activities[J/OL]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2021. DOI: 10.1007/s00167-020-06384-9.
- [26] WANG W, YUE B, WANG J, BEDAIR H, RUBASH H, LI G. Posterior condyle offset and maximum knee flexion following a cruciate retaining total knee arthroplasty[J]. J Knee Surg, 2019, 32: 146-152.
- [27] TSAI T Y, LIOW M H L, LI G, ARAUZ P, PENG Y, KLEMT C, et al. Bi-cruciate retaining total knee arthroplasty does not restore native tibiofemoral articular contact kinematics during gait[J]. J Orthop Res, 2019, 37: 1929-1937.
- [28] LYNCH J T, PERRIMAN D M, SCARVELL J M, PICKERING M R, WARMENHOVEN J, GALVIN C R, et al. Shape is only a weak predictor of deep knee flexion kinematics in healthy and osteoarthritic knees[J]. J Orthop Res, 2020, 38: 2250-2261.
- [29] CHOW J C K, BOYD S K, LICHTI D D, RONSKY J L. Robust self-supervised learning of deterministic errors in single-plane (monoplanar) and dual-plane (biplanar) X-ray fluoroscopy[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2020, 39: 2051-2060.
- [30] HOSSEINI A, LI J S, GILL T J, LI G. Meniscus injuries alter the kinematics of knees with anterior cruciate ligament deficiency[J/OL]. Orthop J Sports Med, 2014, 2: 2325967114547346. DOI: 10.1177/2325967114547346.

[本文编辑] 杨亚红