

面向篮球投篮动作的无标记捕捉误差传播模型及关节轨迹修正算法

林路翔

广西师范大学, 中国·广西 桂林 541000

摘要: 无标记动作捕捉技术在篮球投篮动作分析中展现出巨大潜力, 但深度学习方法输出的关节点轨迹常含有非物理的随机抖动和系统性偏差, 尤其在上肢末端(腕、指)处误差被显著放大。现有的处理滤波方法多忽略上肢运动链的几何约束, 且难以在抑制噪声的同时保留投篮出手阶段的瞬时特征。为此, 本文首先分析了无标记姿态估计中肩、肘、腕、指尖四类关键点的误差统计特性; 其次, 基于串联运动链建立误差传播模型, 利用雅可比矩阵推导关节角度误差与关节点位置误差之间的解析关系, 揭示了投篮动作中误差放大的力学机制; 进而提出一种融合扩展卡尔曼滤波与运动学约束的关节轨迹修正算法, 通过杆长恒定、关节运动范围及出手时刻特征保持策略, 实现对噪声的有效抑制和动作特征的保留。仿真和真实实验结果表明, 该算法可将关节角度的均方根误差降低 30% 以上, 腕角速度峰值衰减控制在 5% 以内, 出手角度误差小于 2° , 显著优于低通滤波和标准卡尔曼滤波。本文方法为无标记系统下的高保真投篮运动分析提供了可靠的理论与算法基础。

关键词: 无标记动作捕捉; 误差传播模型; 关节轨迹修正; 扩展卡尔曼滤波; 篮球投篮

Markerless Capture Error Propagation Model and Joint Trajectory Correction Algorithm for Basketball Shooting Motions

Lin Luxiang

Guangxi Normal University, China Guangxi Guilin 541000

Abstract: Markerless motion capture technology has shown great potential in analyzing basketball shooting motions. However, joint trajectories output by deep learning-based methods often suffer from non-physical random jitter and systematic bias, with errors significantly amplified at the distal endpoints of the upper limbs (wrist and fingers). Existing filtering methods mostly ignore the geometric constraints of the upper-limb kinematic chain and struggle to suppress noise while preserving the instantaneous features of the shooting release phase. To address this issue, this paper first analyzes the statistical error characteristics of four key joint points—shoulder, elbow, wrist, and fingertip—in markerless pose estimation. Second, an error propagation model is established based on the serial kinematic chain, and the analytical relationship between joint angle errors and joint position errors is derived using the Jacobian matrix, revealing the mechanical mechanism of error amplification during shooting. Furthermore, a joint trajectory correction algorithm that integrates extended Kalman filtering with kinematic constraints is proposed. By enforcing constant link length, joint range of motion, and release-phase feature preservation, the algorithm effectively suppresses noise while retaining motion features. Simulation and real-world experimental results demonstrate that the proposed algorithm reduces the root mean square error of joint angles by more than 30%, limits the peak wrist angular velocity attenuation to within 5%, and achieves a release angle error of less than 2° , significantly outperforming low-pass filtering and standard Kalman filtering. This method provides a reliable theoretical and algorithmic foundation for high-fidelity shooting motion analysis under markerless systems.

Keywords: Markerless motion capture; Error propagation model; Joint trajectory correction; Extended Kalman filter; Basketball shooting

0 引言

篮球投篮是一项对上肢运动精度要求极高的技能。基于深度学习的人体姿态估计方法(如 OpenPose、Media

Pipe、HRNet)使得从普通视频中提取关节点坐标成为可能, 为低成本、非侵入式的投篮动作分析开辟了新途径^[1-2]。然而, 无标记动作捕捉系统输出的关节点轨迹不可避免地

包含多种误差：图像检测的随机抖动、深度方向模糊、遮挡导致的关键点漂移、以及关节点定义与真实解剖位置之间的系统偏差。这些误差在传递到关节角度、角速度等生物力学参数时会被放大，严重降低后续投篮参数提取的可靠性。

针对关节点轨迹的滤波与修正，已有研究多采用低通滤波器^[3]、Savitzky-Golay 平滑^[4]或标准卡尔曼滤波^[5]。这些方法将各关节点视为独立的时间序列，未能利用人体上肢的运动学约束（如杆长恒定、关节角度范围、末端轨迹连续性）。更为严重的是，投篮动作包含快速腕指屈伸和出手瞬间的末端速度峰值，通用平滑器容易过度衰减这些关键动力学特征，导致出手角度、腕指协同等核心参数失真。

因此，需要一种面向投篮动作的误差传播模型来定量描述关键点误差如何传递至关节角度，并在此基础上设计运动学约束的轨迹修正算法，以在抑制噪声的同时保留动作的瞬时特征。本文的主要目的包括：建立无标记捕捉误差在上肢运动链中的传播模型，推导关节角度误差协方差与关节点误差协方差的解析关系，揭示投篮出手阶段误差放大的力学原因；设计融合扩展卡尔曼滤波与运动学约束的修正算法，引入杆长恒定约束、关节运动范围约束和基于出手检测的自适应平滑策略；

通过仿真与真实实验验证算法的有效性，为后续高精度投篮参数提取提供可靠的数据基础。

1 误差传播模型

1.1 上肢运动学链

将上肢简化为肩（S）、肘（E）、腕（W）、指尖（F）四个关键点构成的串联运动链。定义肩关节为基坐标系原点，杆长 $l_1 = \|p_e - p_s\|$ （上臂）， $l_2 = \|p_w - p_e\|$ （前臂）， $l_3 = \|p_f - p_w\|$ （手部）。在投篮动作中，主要运动位于矢状面，但为通用性，本文采用三维模型。

节角度向量， $\Theta = [\theta_s, \phi_s, \theta_e, \phi_e, \theta_w, \phi_w]^T$ 其中 θ 表示屈伸角， ϕ 表示内收 / 外展角。正向运动学 $p_i = f(\Theta)$ 通过逐次旋转和平移计算。

1.2 误差传播的雅可比形式

无标记系统直接估计关节点位置 $\tilde{p} = [\tilde{p}_s, \tilde{p}_e, \tilde{p}_w, \tilde{p}_f]^T$ 。通常采用逆运动学（IK）求解关节角度 $\tilde{\Theta}$ ，即最小化重投影误差：

$$\tilde{\Theta} = \arg \min_{\Theta} \sum_{i \in \{s, e, w, f\}} \|\tilde{p}_i - p_i(\Theta)\|^2$$

在真实值 Θ_0 附近线性化，有：

$\tilde{\Theta} \approx \Theta_0 + J^+(\Theta_0)\delta p$ 其中 (J) 为所有观测点对关节角度的雅可比矩阵（维度 12×6 ）， $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$ 为伪逆， $\delta p = \tilde{p} - p(\Theta_0)$ 。由此，关节角度误差的协方差为：

$$Cov(\delta \Theta) = J^+ Cov(\delta p) (J^+)^T$$

1.3 投篮动作中的误差放大效应

雅可比矩阵的条件数 $\kappa(J)$ 刻画了位置误差向角度误差的放大程度。数值计算表明：

在投篮准备阶段（腕关节中立位）， $\kappa \approx 5$ ，放大适中；

在出手前 50 ms，腕关节快速屈曲，指尖接近球体，此时 κ 可升至 20 以上，原因是腕、指尖的小位置扰动会显著影响腕屈曲角和手指释放角的求解。

深度方向误差（ δp_z ）对角度误差的贡献尤为突出，因为深度扰动会改变投影几何，使伪逆产生大增益。

该分析解释了为何无标记系统在投篮出手阶段输出的关节角度会出现剧烈非物理波动。

2 关节轨迹修正算法

2.1 算法总体框架

算法分为三个模块（图 1）：

预处理：线性插值填补短暂缺失帧（<5 帧）；基于速度阈值剔除离群点（>3 倍标准差）。

运动学约束扩展卡尔曼滤波（EKF）：将各关节点三维位置和速度作为状态，融合杆长恒定约束，通过投影法保证运动学一致性。

出手阶段特征保持：检测出手时刻，自适应调整滤波强度。

2.2 扩展卡尔曼滤波设计

状态变量：取所有关节点（S、E、W、F）的三维位置和速度，共 24 维：

$$x_k = [p_s^T, v_s^T, p_e^T, v_e^T, p_w^T, v_w^T, p_f^T, v_f^T]^T$$

过程模型：采用常速度模型（CV），即

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k, A = \text{blockdiag}([1 \quad \Delta t] \otimes I_3)$$

其中 $w_k \sim N(0, Q)$ ， (Q) 为过程噪声协方差。

观测模型：观测值为无标记系统输出的关节点位置， $(z_k = [\tilde{p}_s^T, \tilde{p}_e^T, \tilde{p}_w^T, \tilde{p}_f^T]^T)$ ，观测矩阵 $(H = [I_{12} \quad 0_{12 \times 12}])$ ，观测噪声协方差 (R) 根据 2.2 节的统计特性设定（对不同关节点不同）。

运动学约束投影：标准 EKF 更新后的状态 $(\hat{x}_k)$ 可能违反杆长恒定。因此，采用投影法修正：对每对相邻关节

点 (S-E、E-W、W-F)，调整其位置使其距离等于预先标定的杆长 (l_i)，同时保持整体质心不变。该问题可分解为每对关节点的距离约束投影：

$$(p_j' = p_i + l_i \frac{p_j - p_i}{\|p_j - p_i\|})$$

迭代 2~3 次直至所有杆长误差小于 1 mm。

2.3 出手阶段特征保持策略

出手时刻检测：基于腕关节速度幅值 (v_w) 和指尖与球心距离 (d_{fb})。当 $\setminus(v_w > 0.8 \max(v_w))$ 且 d_{fb} 从减小转为增加时，判定出手帧 (k_r)。

自适应滤波：定义动作阶段标志 (γ_k)，出手前 30 ms 至后 30 ms 内 ($\gamma_k=1$) (高动态)，其余 ($\gamma_k=0$)。过程噪声协方差 调整为：

$$(Q_k = Q_0 \cdot (1 + 10 \cdot \gamma_k))$$

增加过程噪声允许滤波器在出手阶段更信任预测 (即保留快速变化)，从而避免过度平滑。同时，观测噪声协方差 (R) 在该阶段保持不变，因为无标记观测本身已不可靠。

2.4 算法流程

输入：原始关键点序列 $\{z_k\}$, $k=1..N$ ；杆长 l_1, l_2, l_3 ；出手时刻 k_r (可选自动检测)

输出：修正后序列 $\{x_k^{refined}\}$

初始化： x_0 = 由前两帧线性初始化， P_0 = 对角阵

For $k = 1$ to N :

预测

$x_{pred} = A * x_{k-1}$

$P_{pred} = A * P_{k-1} * A^T + Q_k$

更新

$K = P_{pred} * H^T * (H * P_{pred} * H^T + R)^{-1}$

$x_{est} = x_{pred} + K * (z_k - H * x_{pred})$

$P_{est} = (I - K * H) * P_{pred}$

运动学约束投影

$x_{proj} = \text{KinematicProjection}(x_{est}, l_1, l_2, l_3)$

$x_k^{refined} = x_{proj}$

End

3 实验验证

3.1 仿真数据实验

数据生成：采用标准投篮运动学模型 (文献^[7]中典型关节角度曲线)，采样频率 100 Hz，时长 2 s。通过正向运动学生成真实关节点轨迹。叠加以下噪声模拟无标记输出：

高斯噪声：($\sigma=10\text{ mm}$) (各向同性)；

深度方向额外噪声：($\sigma_z=20\text{ mm}$)；

出手前 100 ms 内，噪声幅值增加 50%；

随机遮挡：5% 的帧中腕或指尖被设为缺失。

对比方法：

Raw：原始含噪数据；

LPF：截止频率 6 Hz 的零相位低通滤波；

KF：标准卡尔曼滤波 (无运动学约束)；

Proposed：本文算法。

评价指标：

关节角度 RMSE (肩屈伸、肘屈伸、腕屈伸)；

腕角速度峰值相对误差；

出手角度绝对误差；

运行时间 (每帧)。

表1 结果

方法	肩角 RMSE(°)	肘角 RMSE(°)	腕角 RMSE(°)	腕速峰值 误差 (%)	出手角 度误差 (°)
Raw	6.2	8.5	14.7	32.4	5.8
LPF	3.8	4.9	8.2	18.6	3.1
KF	3.1	4.2	7.5	12.3	2.7
Proposed	2.1	2.9	4.8	4.2	1.4

本文算法在所有指标上均最优，腕角 RMSE 降低约 67% (相比 Raw)，腕速峰值误差仅 4.2%，显著优于 LPF 的 18.6%。出手角度误差控制在 1.4°，满足生物力学分析要求。

3.2 真实数据实验

采集设置：同步使用 Vicon (8 摄像头，200 Hz) 和单目 RGB 相机 (60 fps) 记录 5 名健康男性各 20 次原地投篮。使用 MediaPipe 提取 2D 关键点，基于已知相机参数和三角测量 (假定肩关节深度由 Vicon 提供) 转换为 3D。以 Vicon 数据为真值。

结果：本文算法将腕关节角度 RMSE 从原始 MediaPipe 的 19.3° 降低至 5.2°，改善幅度 73%；出手角度误差从 6.7° 降至 2.1°。

试次轨迹图显示，原始轨迹在出手前有明显抖动，本文算法恢复出平滑且保持峰值的腕角速度曲线。

4 讨论

4.1 算法的理论意义

本文提出的误差传播模型揭示了无标记捕捉中关节角度误差被放大的内在原因：投篮出手阶段雅可比矩阵条件数骤增，导致末端微小扰动转化为关节角度的大幅波动。这一发现提示单纯依赖通用平滑无法解决结构性的误差放大问题，必须引入运动学约束。所提出的 EKF+ 投影方法，本质上是在贝叶斯框架下融合了人体解剖先验，从而有效

约束了解空间。

4.2 算法局限性与改进方向

本算法依赖于准确的杆长估计, 可通过静态 T 姿势校准或比例缩放获取, 但对于体型差异大的受试者需个体化标定。

严重遮挡(手部完全被球遮盖)会导致观测缺失超过 5 帧, 此时插值失效。可结合人体动力学模型(如基于 RNN 的预测)填补长时缺失。

当前算法未利用双目或多视角信息, 若有多视角, 可将三维重建的误差模型进一步扩展, 通过多视角一致性提高鲁棒性。

4.3 对投篮分析的启示

经过本算法修正后的关节轨迹, 可更可靠地计算出手角度、腕指协同系数等参数, 为基于无标记视频的投篮技术诊断提供技术支撑。此外, 算法的时间复杂度为 $O(N)$, 单帧处理耗时约 3 ms (MATLAB 实现), 具备实时应用潜力。

5 结语

本文针对无标记动作捕捉在篮球投篮分析中的关键点误差问题, 建立了上肢运动链的误差传播模型, 揭示了出手阶段误差放大的力学本质。在此基础上, 提出了融合扩展卡尔曼滤波与运动学约束的关节轨迹修正算法, 通过杆长投影和出手阶段自适应平滑, 实现了对噪声的有效抑制与动作特征的保留。仿真与真实实验证明, 该算法可将关节角度 RMSE 降低 30% 以上, 腕角速度峰值衰减控制在

5% 以内, 显著优于传统滤波方法。本研究为无标记系统下的高保真投篮运动分析提供了理论与算法基础, 有望推动低成本、非侵入式投篮技术评估的实用化。

参考文献:

- [1] Cao Z, Hidalgo G, Simon T, et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. IEEE TPAMI, 2021, 43(1): 172-186.
- [2] Lugaresi C, Tang J, Nash H, et al. MediaPipe: A framework for building perception pipelines. arXiv:1906.08172, 2019.
- [3] Winter D A. Biomechanics and motor control of human movement. 4th ed. Wiley, 2009.
- [4] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [5] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. J. Basic Eng., 1960, 82(1): 35-45.
- [6] Trumble M, Gilbert A, Malleson C, et al. Total Capture: 3D human pose estimation fusing video and inertial sensors. BMVC, 2017.
- [7] Okazaki, V. H. A., & Rodacki, A. L. F. (2012). Increased distance of shooting on basketball jump shot. *Journal of Sports Science and Medicine*, *11*, 231 - 237.

作者简介: 林路翔(2001.05-), 男, 汉族, 广西玉林人, 硕士, 研究方向: 体育。