

## 雙目3D重建結果驗證指南

以下是一張雙目攝影機三角測量3D座標結果的驗證方法總表：

驗證方法名稱	驗證目的	具體用途	推薦驗證規則或標準	實施難度	所需時間成本	優先等級
重投影誤差 (Reprojection Error)	檢驗3D重建結果與原始2D觀測的一致性，評估重建精度	將計算出的3D點重新投影回左右相機影像，與原始影像座標比較誤差	平均重投影誤差應盡量小於1~2像素 (< 2 px) <sup>1</sup> ；若誤差超過2 px則需調整校準或排查數據 <sup>1</sup>	極低	約2分鐘	必做
人體器官長度一致性檢查	驗證人體骨架幾何的合理性，確保人體各部位長度在重建中保持一致	若重建對象為人體關節，計算各對應肢體關節間的距離（如上臂、腿部長度）在整個序列中的變化	各肢體骨骼長度應在各影格間保持近乎不變（變動幅度極小）；例如長度標準差控制在平均值的5%以內，以確保姿態穩定 <sup>2</sup>	中	約5分鐘	強烈建議
深度距離合理性檢查	檢驗3D點的深度值和距離是否在合理範圍內，符合場景物理尺寸	檢視所有計算出的深度Z值或物距，判斷有無明顯異常的值（過遠、過近或負值）	深度值應為正且落在預期範圍內；例如在室內場景中物體距離通常<10公尺，如出現極端遠距離（數十公尺以上）或負距離則視為異常。確保計算深度未超出雙目相機有效量測範圍（如未出現無窮遠情況） <sup>3</sup>	低	約3分鐘	強烈建議
物理運動邏輯檢查 (加速度合理性)	驗證目標運動是否符合物理規律（速度、加速度是否合理）	根據連續3D座標計算速度和加速度，檢查其變化趨勢是否合乎物理常識	加速度曲線應平滑且在合理範圍：自由拋體應呈現接近恆定的向下重力加速度約-9.8 m/s <sup>2</sup> <sup>4</sup> （水平加速度約0）；物體不應瞬間產生超常加速度（如人為拋出物體水平方向不應有劇烈抖動或反向加速）	中	約10分鐘	建議

驗證方法名稱	驗證目的	具體用途	推薦驗證規則或標準	實施難度	所需時間成本	優先等級
3D可視化觀察	直觀審查3D重建軌跡和點雲的形狀及一致性，發現肉眼可辨別的異常	使用3D繪圖工具將軌跡/點雲渲染，可旋轉視角觀察其形狀和運動路徑	人眼檢視3D軌跡應呈平滑連續的曲線或合理形狀；若發現單一點明顯偏離軌跡或軌跡出現不自然折線，即判定為異常。建議從多角度檢視，以確保空間結構正確	極低	約2~5分鐘	建議
空間一致性檢查	檢驗3D重建點在空間中的幾何關係是否自洽，符合已知環境約束	利用場景已知的空間資訊或多點相對位置，確認重建結果沒有幾何衝突	例如：確保物體在重建中未“穿透”地面或牆壁（高度應 $\geq 0$ ）；若球體據信沿垂直平面運動，可檢查其所有軌跡點是否近乎共平面；多目標重建時，保持彼此之間已知固定距離（如剛體結構）的點間距離保持一致	中	約5分鐘	建議
時間平滑性檢查	檢驗重建軌跡在時間上的連續性，確認沒有不自然的抖動或跳躍	檢查逐幀位置變化差異，或對軌跡進行平滑處理以評估噪聲程度	相鄰影格的位移和速度變化應平順無劇烈震盪；若軌跡點位置幀與幀之間出現明顯抖動，表示結果含有高頻噪聲 <sup>5</sup> 。可採用濾波（如移動平均）測試，平滑後軌跡若與原始軌跡差異很大則表示平滑性不足	低	約2分鐘	建議

## 備註說明

- **重投影誤差**：將每一幀重建出的3D點利用相機內參和外參投影回左右影像平面，計算其與原始2D檢測位置的距離。重投影誤差是評估重建精度的直接指標；平均誤差若能低於1像素則非常理想，低於2像素屬可接受範圍<sup>6</sup><sup>1</sup>。若發現誤差偏大（例如>2像素），應檢查攝影機標定、同步和特徵匹配過程，因為過高的誤差通常意味著校準不準確或對應點匹配有誤<sup>1</sup>。重投影誤差計算實施難度極低，建議每次重建後都立即計算此指標來驗證結果品質。
- **人體器官長度一致性**：針對人體3D重建（如姿態估計），同一個人的骨骼長度在短時間內應視為恆定不變。因此，可選取身體主要關節點對（例如肩膀-肘、髖-膝等）計算各幀的距離，觀察其在時間序列上的變化幅度。理論上這些距離應保持一致，任何明顯的縮短或拉長都不合理<sup>7</sup>。實際驗證時可允許極小的誤差容限，例如5%以內的變動。如果超出此範圍，可能表示3D定位不穩定或縮放因素推算有誤。保持骨架長度一致性有助於提高姿態重建的穩定性<sup>2</sup>；如發現長度漂移，可考慮引入骨架長度約束來優化3D重建模型。
- **深度距離合理性**：由雙目三角測量得到的距離應該符合場景的已知尺度。首先，所有計算得到的深度值必須為正（物體不可能出現在相機後方的負距離）。其次，深度值不應超出相機系統的合理量測範圍。例如，一組基線和焦距固定的雙目相機對於超出一定距離的物體幾乎無法產生有效視差，因此若重建結果出現極遠距離（比如數十公尺甚至無窮遠），多半是匹配誤差導致的虛假結果<sup>3</sup>。驗證時可根據場

景預期：如在房間內，典型物件距離可能在幾公尺內；在戶外球場，球的飛行距離或高度也有上限。將重建的最大/最小距離與這些預期比較，若嚴重不符（例如重建出一個遠超實際可能距離的值），應標記為異常。此項檢查難度不高且非常重要，因為無實際量測作參考時，合乎常理的距離範圍是驗證重建可信度的基本依據。

- **物理運動邏輯檢查**：針對運動中的物體，驗證其運動軌跡是否遵循物理定律。例如自由落體或拋射運動理應具有恆定的重力加速度。具體作法是利用相鄰時間的3D座標計算瞬時速度，再由速度計算加速度，觀察加速度是否接近常數。在沒有空氣阻力的理想情況下，垂直方向加速度應約為 $-9.8 \text{ m/s}^2$  <sup>4</sup>（方向向下），水平方向加速度應接近0（速度保持恆定）<sup>4</sup>。如果分析發現重建軌跡的垂直加速度明顯偏離重力值（例如正負劇烈波動），或水平方向出現不合理的突然減速/加速，可能意味重建點受到噪聲干擾。對一般物體運動，也可設定一個合理加速度閾值，例如行走人體每幀速度改變不應超過某一值，否則說明關鍵點識別出了跳躍。**實用建議**：在已知運動模型（如拋物線運動）的情況下，可將重建軌跡與物理模型擬合，比如擬合求得重力加速度並與 $9.8 \text{ m/s}^2$ 比較，以此驗證重建的尺度和可靠性。
- **3D可視化觀察**：將3D重建的點或軌跡進行可視化，是發現問題的直接而有效的方法。透過例如Matplotlib、Open3D等工具繪製3D散點圖或軌跡線，從不同角度觀察，可以直觀地檢查整體形狀是否合理、連續性是否良好。**實用重點**：觀察軌跡時應呈現平滑的曲線（對於運動軌跡）或合理的空間佈局（對於靜態點雲）。若看到某些點明顯偏離了主要軌跡（離群點）或者軌跡出現不連續的“折角”，這通常說明重建存在問題（例如誤匹配導致的瞬間跳變）。人工檢視能補足自動數值檢查的不足——有些微小誤差累積的異常形變，透過人眼觀察三維圖形往往能及早發現。此外，也建議將重建結果與原始影像同步觀察（例如把3D點投影回影像做疊加動畫），確認3D運動與2D影片中的物體運動軌跡相符。
- **空間一致性檢查**：此檢查著重於3D結果是否與場景中已知的空間關係相一致。一種情況是**環境約束**：如果場景中存在固定結構（地面、牆面等），重建結果應尊重這些結構的位置。例如，若重建一顆球在地面上彈跳，則當球觸地時，其3D座標的高度應接近地面高度（可由首次觸地點估計地平面），之後沿著合理的拋物線彈起；若球的重建軌跡“陷入”地面下方，明顯不合理。同樣地，重建的人體不應出現腳底高於地面太多或穿透地板的情況。另一種情況是**多目標/多關係約束**：如果同時重建多個互有已知關係的點，例如一個剛性物體的多個標誌點，它們之間的相對距離和布局在重建結果中應該保持一致（這與前述“人體骨骼長度檢查”屬於類似原理）。再例如，對於在空中飛行且不受側向力的拋體，其運動應該局限在某一垂直平面內。我們可以嘗試將整條3D軌跡擬合到一個平面上，若發現大部分點都在同一平面附近而偏離量很小，表示空間一致性良好；反之如果點雲分散在空間中無法用單一平面描述，而理論上又應該是平面的運動，則暗示重建誤差較大。空間一致性檢查需要一定場景知識，建議結合對拍攝環境的瞭解（例如相機布置高度、地面大致位置）來設計具體的檢驗策略。
- **時間平滑性檢查**：由於雙目重建會受每幀圖像特徵匹配誤差影響，重建出的軌跡可能存在高頻抖動。時間平滑性檢查即評估結果在時間維度上的平順程度。一個簡單的方法是計算相鄰影格之間的位移差或速度變化：對理想平滑運動而言，幀與幀之間的速度改變應該比較小且連續。如果計算得到速度劇烈忽上忽下、方向頻繁來回擺動，說明存在抖動現象<sup>5</sup>。我們也可以將重建軌跡進行平滑濾波處理（如移動平均或Savitzky-Golay濾波），再與原始軌跡比較：若兩者差別很小，表示原始軌跡本就平滑可靠；反之若平滑後軌跡明顯更合理順暢，則原始軌跡包含了較多隨機噪聲<sup>8</sup>。需要注意的是，某些真實情況下的劇烈變化（例如物體碰撞反彈時速度瞬間改變）是合理的物理現象，不應誤判為抖動。因此在檢查平滑性時要結合上下文判斷：區分何種變化屬於預期事件，何種變化是不應該出現的測量誤差。總體而言，一條高品質的3D軌跡應當在無碰撞的階段保持速度和加速度的漸變，而不是桿狀的鋸齒波動。

---

<sup>1</sup> <sup>6</sup> [【相机标定】OpenCV 相机标定中的重投影误差与角点三维坐标计算详解-CSDN博客](https://blog.csdn.net/qq_41140324/article/details/147836437)

[https://blog.csdn.net/qq\\_41140324/article/details/147836437](https://blog.csdn.net/qq_41140324/article/details/147836437)

<sup>2</sup> <sup>7</sup> [迁移性好、多用途，港中文提出特征分离的无监督人类三维姿态表征-腾讯云开发者社区-腾讯云](https://cloud.tencent.com/developer/article/1689800?policyId=1004)

<https://cloud.tencent.com/developer/article/1689800?policyId=1004>

3 What to Expect from a Stereo Vision System - NI

[https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision/page/what-to-expect-from-a-stereo-vision-system.html?srsltid=AfmBOoqJRFe6vGH2QzleBXkXjdIwMIBrAO6zlc9NVX\\_qMZFIYPJl4z](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision/page/what-to-expect-from-a-stereo-vision-system.html?srsltid=AfmBOoqJRFe6vGH2QzleBXkXjdIwMIBrAO6zlc9NVX_qMZFIYPJl4z)

4 5.3 Projectile Motion - Physics | OpenStax

<https://openstax.org/books/physics/pages/5-3-projectile-motion>

5 8 python - How can I use smoothing techniques to remove jitter in pose estimation? - Stack Overflow

<https://stackoverflow.com/questions/52450681/how-can-i-use-smoothing-techniques-to-remove-jitter-in-pose-estimation>