

DOI: 10.53104/xdkxsts.2026.02.02.001

小型無人機 GNSS-INS 集成定位的理論可行性分析

劉睿¹

1. 山東交通學院，山東 濟南 250357

摘要：小型無人機在測繪、巡檢、農業監測、災害調查和低空運輸等領域具有廣泛應用。定位能力是小型無人機安全飛行和任務執行的重要基礎。GNSS 可以提供絕對位置資訊，系統結構簡單，使用成本較低，但它容易受到信號遮擋、多徑效應和環境干擾的影響。INS 可以通過加速度計和陀螺儀連續推算無人機的速度、姿態和位移，不依賴外部信號，但誤差會在積分計算中不斷累積。單獨依靠 GNSS 或 INS 都難以滿足複雜環境下小型無人機對連續性、即時性和穩定性的定位需求。GNSS-INS 集成定位可以利用兩種技術的互補關係。GNSS 能夠修正 INS 的長期漂移，INS 能夠在 GNSS 信號短時中斷時維持定位連續性。本文以非實證研究方式，從 GNSS 定位原理、INS 定位原理、兩者互補特性、集成定位方法和技術限制等方面進行理論分析。分析認為，GNSS-INS 集成定位在小型無人機平臺上具有理論可行性，但其應用效果受到感測器精度、計算能力、時間同步、信號環境和融合演算法設計等因素影響。

關鍵字：小型無人機；GNSS；INS；集成定位；理論可行性；資料融合

Theoretical Feasibility Analysis of GNSS-INS Integrated Positioning for Small UAVs

LIU Rui¹

1. Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, P. R. China

Correspondence to: LIU Rui; Email: ruiuu798@126.com

Abstract: Small UAVs are widely used in mapping, inspection, agricultural monitoring, disaster investigation, and low-altitude transport. Positioning is an important basis for safe flight and task execution. GNSS can provide absolute position information with a simple system structure and relatively low cost, but it is easily affected by signal blockage, multipath effects, and environmental interference. INS can continuously estimate the velocity, attitude, and displacement of a UAV through accelerometers and gyroscopes. It does not depend on external signals, but its errors accumulate during integration. GNSS or INS alone is difficult to meet the positioning needs of small UAVs in complex environments, especially in terms of continuity, real-time response, and stability. GNSS-INS integrated positioning can use the complementary features of the two technologies. GNSS can correct the long-term drift of INS, while INS can maintain positioning continuity when GNSS signals are briefly interrupted. This paper uses a non-empirical approach to analyze GNSS positioning principles, INS positioning principles, their complementary characteristics, integration methods, and technical limitations. The analysis shows that GNSS-INS integrated positioning is theoretically feasible for small UAVs, but its performance is affected by sensor accuracy, computing capability, time synchronization, signal environment, and fusion

通信作者：ruiuu798@126.com

引用格式：劉睿. 小型無人機 GNSS-INS 集成定位的理論可行性分析[J]. 現代科學探索, 2026, 2(2): 1-5.

algorithm design.

Key words: small UAV; GNSS; INS; integrated positioning; theoretical feasibility; data fusion

引言

小型無人機體積小、成本低、操作靈活，已經被用於航拍測繪、農田巡查、災害監測、物流運輸和安防巡檢等場景。定位能力是無人機完成任務的基礎。無人機需要知道自身位置，也需要根據位置完成航線控制、目標跟蹤、返航降落和避障操作。如果定位結果不穩定，飛行路徑可能出現偏差。嚴重時，無人機可能偏離任務區域，甚至失控或墜落。小型無人機的定位問題關係到飛行精度，也關係到飛行安全。

GNSS 是小型無人機常用的定位方式。它通過衛星信號提供直接的位置資訊，成本低，系統結構簡單。在開闊環境下，GNSS 可以滿足一般飛行任務的定位需求。但 GNSS 對外部環境依賴強。無人機在高樓附近、山谷、樹林上方或橋樑附近飛行時，衛星信號可能被遮擋，也可能受到反射信號干擾。此時，定位結果會出現跳變、延遲或精度下降。若信號短時間中斷，單獨依靠 GNSS 定位系統難以保持連續位置輸出。

INS 是另一種常用定位方式。它依靠加速度計和陀螺儀測量無人機運動狀態，通過計算得到速度、姿態和位置變化。INS 不依賴外部信號，在 GNSS 信號弱或暫時中斷時仍能工作。它輸出頻率高，可以反映無人機短時間運動變化。INS 定位結果來自連續積分計算。感測器存在零偏、雜訊和安裝誤差，這些誤差會在計算中累積。飛行時間越長，位置偏差可能越大。小型無人機受載荷和成本限制，慣性感測器精度有限，誤差累積問題明顯。

單獨使用 GNSS 或 INS 都有不足。GNSS 提供絕對位置，但容易受環境影響。INS 提供連續運動資訊，但誤差隨時間增加。兩種技術特點互補。GNSS-INS 集成定位基於互補關係提出。GNSS 可以修正 INS 長期漂移，INS 可以在 GNSS 信號短時失效時維持位置估計連續性。資料融合後，系統比單一感測器更穩定。

理論上，GNSS-INS 集成定位適合小型無人機飛行需求。無人機飛行速度快，姿態變化頻繁，任務環境可能複雜。定位系統需要同時滿足連續性、即時性和一定精度。GNSS-INS 集成方法把衛星定位的全域資訊和慣性導航的短時運動資訊結合，為無人機提供可靠的位置和姿態估計。本文不做實驗測試，而從定位原理、誤差特徵、系統互補性和應用條件分析小型無人機 GNSS-INS 集成定位的理論可行性。

1 GNSS 定位原理

GNSS 是全球導航衛星系統的總稱，常見系統有 GPS、北斗、GLONASS 和 Galileo。小型無人機通常通過機載 GNSS 接收機接收衛星信號，然後計算自身的位置、速度和時間資訊。GNSS 系統主要由衛星、地面控制系統和使用者接收設備組成。衛星在空間中持續發送導航信號，信號中包含衛星位置、時間資訊和軌道參數。地面控制系統負責監測衛星運行狀態，也負責修正衛星軌道和時間誤差。無人機上的接收機負責接收這些信號，並根據接收到的資訊進行定位計算^[1]。

對小型無人機來說，GNSS 接收機通常體積較小，重量較輕，功耗也比較低。這些特點適合無人機平臺的使用條件。接收機可以接收一個或多個衛星系統的信號。多系統接收能夠增加可見衛星數量，也能提高定位穩定性。無人機在開闊區域飛行時，接收機通常可以同時接收到多顆衛星信號。可用衛星越多，定位計算的條件越好，位置結果也更穩定。

GNSS 定位的基礎是測距。衛星信號從衛星發出後，需要時間才能到達無人機接收機。接收機通過計算信號傳播時間，再乘以信號傳播速度，就可以得到接收機到衛星的距離。這個距離通常叫偽距。叫“偽距”是因為測量結果中不僅包含真實距離，還包含接收機鐘差、衛星鐘差、大氣延遲和其他誤差。接收機需要同時接收多顆衛星信號，並通過計算估計這些

誤差。

在三維空間中，接收機要確定自身位置，至少需要四顆衛星的資訊。三顆衛星可以提供空間位置約束，第四顆衛星可以修正接收機時間誤差。每顆衛星都可以看作一個已知位置點，接收機到衛星的距離形成一個空間範圍。多個空間範圍相交後，可以求出接收機的大致位置。這個過程叫三角定位或空間交會定位。無人機上的 GNSS 接收機用這種方式得到經度、緯度和高度資訊，並把資訊傳給飛控系統。

GNSS 定位精度會受到多種因素影響。大氣干擾常見。衛星信號在穿過電離層和對流層時，傳播速度會變化，信號到達時間也會偏差。接收機如果不能修正延遲，計算出的距離就不準確。距離誤差會傳遞到位置結果，使無人機定位偏差。多徑效應也會影響 GNSS 定位。衛星信號可能被建築物、地面、水面或其他物體反射。接收機接收的信號可能不是直接來自衛星，而是反射信號。反射信號傳播路徑更長，到達時間也會改變。接收機如果把反射信號當正常信號處理，定位結果可能跳變。小型無人機在城市低空、橋樑附近或山地飛行時，多徑效應容易出現。

信號遮擋也是重要問題。GNSS 需要接收衛星無線電信號。無人機飛到高樓之間、樹林下方、山谷或隧道時，衛星信號可能被遮擋。可用衛星減少後，定位精度下降。遮擋嚴重時，接收機甚至無法定位。無人機飛控系統如果只用 GNSS，可能短時間內失去穩定位置輸入。GNSS 還可能受衛星幾何分佈影響。即使接收機看到多顆衛星，如果衛星在天空中分佈集中，定位結果也可能不穩定。較好分佈提供強位置約束，較差分佈放大測距誤差，使位置解算精度下降。這種影響會直接反映在無人機航線跟蹤、懸停控制和返航精度上^[2]。

GNSS 優勢是提供絕對位置，長期誤差不會像慣性導航那樣累積。它適合提供全域座標資訊，也可作為航線飛行和任務定位基礎資料。GNSS 對外部信號依賴強。信號品質好時，它能穩定工作。信號受干擾或遮擋時，輸出會不連續或不可靠。這個特點說明 GNSS 是小型無人機定位重要基礎，但單獨使用時難以滿足複雜環境下連續定位需求。

2 INS 定位原理

慣性導航系統 (INS) 主要由加速度計和陀螺儀組成。加速度計用來測量無人機在三個軸向上的加速度變化，陀螺儀用來測量無人機的角速度和姿態變化。通過這兩種感測器的輸出，系統可以推算無人機的速度、姿態和位移。整個過程不依賴外部信號，完全基於感測器測量資料完成計算。

INS 的定位方法是通過積分計算得到速度和位置。加速度計測得的加速度經過時間積分得到速度，速度再經過時間積分得到位移。陀螺儀測得的角速度可以用來計算無人機的姿態變化，從而將加速度轉換到地理坐標系中進行位置推算。無人機飛行中，INS 可以連續輸出高頻率的位置和姿態資訊，這對於快速運動和短時間精確控制非常重要。

INS 的精度受到感測器性能的影響。加速度計和陀螺儀存在零偏、雜訊和溫漂，這些誤差會在積分計算中不斷累積。飛行時間越長，誤差積累越明顯，位置偏差可能增大。小型無人機通常受載荷限制，使用的慣性感測器精度有限，因此誤差累積問題更突出。即便短時間內定位精度較好，長時間飛行後位置估計可能偏離真實位置。

INS 的優點在於它可以在任何環境下工作，不受外界信號遮擋或干擾影響。它能夠提供連續、高頻率的運動資訊，對無人機姿態控制和短時間航跡跟蹤有很大幫助。缺點是長期累積誤差不可避免，如果沒有外部資訊進行修正，INS 單獨使用難以保證長期定位精度。

3 GNSS 與 INS 互補特性

GNSS 可以提供絕對的位置資訊。它通過衛星信號計算無人機在地理坐標系中的位置，長期誤差較小，可以為無人機提供全域參考。無人機在開闊環境中飛行時，GNSS 定位結果通常準確可靠。INS 可以提供高頻率的運動資訊。它通過加速度計和陀螺儀測量無人機的加速度和角速度，並將這些資訊轉換為速度、姿態和位移。INS 輸出頻率高，可以連續反映無人機的短時間運動變化，即使在 GNSS 信號受

阻時，也能夠保持連續的位置和姿態估計。GNSS 與 INS 結合可以發揮各自優勢。GNSS 可以修正 INS 的長期漂移，減少位置誤差累積。INS 可以填補 GNSS 信號間斷或短暫失效的空白，使無人機的位置估計更加平滑連續。集成定位系統能夠提供比單獨使用 GNSS 或 INS 更穩定和可靠的位置與姿態資訊^[3]。

4 GNSS-INS 集成方法

GNSS 可以提供絕對位置資訊。它通過衛星信號計算無人機在地理坐標系中的位置，長期誤差較小，可以為無人機提供全域參考。無人機在開闊環境中飛行時，GNSS 定位結果通常比較準確，也比較可靠。INS 可以提供高頻率的運動資訊。它通過加速度計和陀螺儀測量無人機的加速度和角速度，並把這些資訊轉換為速度、姿態和位移。INS 輸出頻率高，可以連續反映無人機短時間內的運動變化。即使 GNSS 信號受阻，INS 也能保持連續的位置和姿態估計。GNSS 與 INS 結合後，可以發揮各自優勢。GNSS 可以修正 INS 的長期漂移，減少位置誤差累積。INS 可以填補 GNSS 信號間斷或短暫失效時的空白，使無人機的位置估計更加平滑、連續。集成定位系統可以提供比單獨使用 GNSS 或 INS 更穩定、更可靠的位置和姿態資訊^[4]。

5 理論可行性分析

小型無人機的載荷和功耗限制可搭載感測器的重量和數量。GNSS 接收機體積小、功耗低，適合無人機平臺。慣性感測器的尺寸和重量也要符合無人機承載能力。計算能力是另一個重要因素。GNSS-INS 集成需要進行資料融合和濾波計算，計算量比單獨使用感測器大。現代小型無人機一般配備嵌入式處理器或飛控計算單元，可以支援基本的集成定位演算法，如卡爾曼濾波。

在複雜環境下，GNSS-INS 集成可以提高定位連續性。GNSS 信號在城市、林區或山區可能被遮擋或反射，導致定位不穩定。INS 可以在短時間維持位置估計，填補 GNSS 信號間斷。GNSS 信號恢復後，可以用來校正 INS 累

積誤差。這個互補特性使集成系統在不同環境下有理論可行性。

集成定位可以提升精度和回應速度。GNSS 提供絕對位置資訊，INS 提供高頻率運動資訊。融合演算法利用 INS 快速反應無人機運動，同時利用 GNSS 修正長期漂移。系統可以在保證短時回應的同時控制長期誤差，使無人機定位更穩定，精度更高。

6 挑戰與技術限制

GNSS-INS 集成定位在理論上具有可行性，但它並不等於沒有技術限制。對小型無人機來說，感測器精度、外部環境和系統計算能力都會影響集成定位效果。這些問題不會否定集成定位的價值，但會影響系統能達到的實際水準。

感測器精度是一個基礎限制。小型無人機通常不能搭載體積大、價格高、精度高的慣性導航設備。它使用的加速度計和陀螺儀多為小型低成本器件。這類器件適合安裝在無人機上，但零偏、雜訊和溫度漂移較明顯。INS 的位置計算依賴連續積分，感測器中的小誤差會在計算過程中被放大。飛行時間越長，位置誤差越容易累積。GNSS 可以對這種誤差進行修正，但修正效果也取決於 GNSS 信號品質和融合演算法的穩定性。如果 GNSS 信號本身不穩定，INS 誤差修正就會受到影響。

GNSS 信號對環境條件比較敏感。小型無人機常在低空飛行，低空環境比高空環境更複雜。城市建築、樹木、山體、橋樑和電力設施都可能遮擋衛星信號。信號被遮擋後，接收機可用衛星數量會減少，定位精度會下降。信號經過牆面、地面或水面反射後，還可能產生多徑效應。接收機如果接收到反射信號，測距結果就會出現偏差。無人機在城市峽谷、林區邊緣或山谷中飛行時，這類問題更容易出現。此時，GNSS 輸出可能出現跳變或短時間中斷，集成系統需要依靠 INS 維持定位連續性。

系統演算法複雜度也是限制因素。GNSS-INS 集成定位不是簡單地把兩種資料放在一起使用，而是要通過濾波演算法估計位置、速度、姿態和誤差狀態。卡爾曼濾波是常見方法，但

它需要建立系統模型和誤差模型。模型設計太簡單，可能無法反映真實飛行狀態。模型設計太複雜，會增加計算壓力。小型無人機的飛控計算資源有限，演算法必須在較短時間內完成計算。如果資料處理速度跟不上飛行狀態變化，定位結果就會滯後。定位滯後會影響航線控制、懸停穩定和返航精度。

即時性要求也會影響系統設計。無人機飛行時，姿態和速度變化較快，定位系統需要持續輸出更新結果。GNSS 更新頻率較低，INS 更新頻率較高，兩類資料在時間上需要對齊。如果時間同步不準確，融合結果可能出現偏差。感測器安裝位置、坐標系轉換和資料延遲也需

要處理。小型無人機空間有限，感測器安裝可能受到機體結構影響。如果安裝誤差沒有校正，也會進入定位計算過程，並影響最終結果^[5]。這些挑戰說明，GNSS-INS 集成定位用於小型無人機時，需要合理選擇硬體，也需要合理設計演算法。感測器不能只看體積和價格，還要考慮雜訊水準和穩定性。演算法不能只追求複雜度，還要考慮飛控平臺的即時處理能力。系統還需要處理信號遮擋、資料延遲和時間同步等問題。只有這些條件基本滿足，GNSS-INS 集成定位才能在小型無人機平臺上發揮較好的作用。

參考文獻：

- [1] 寧津生,姚宜斌,張小紅. 全球導航衛星系統發展綜述[J]. 導航定位學報, 2013, 1(1): 3-8. DOI:10.3969/j.issn.2095-4999.2013.01.002.
- [2] 韓勇強, 於瀟穎, 紀澤源, 等. 面向城市複雜環境的 GNSS/INS 高精度圖優化演算法[J]. 中國慣性技術學報, 2022, 30(5): 582-588. DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2022.05.004.
- [3] 甘雨. GNSS/INS 組合系統模型精化及載波相位定位測姿[D]. 解放軍資訊工程大學, 2015. DOI:10.7666/d.D829530.
- [4] 牛小驥, 班亞龍, 張提升, 等. GNSS/INS 深組合技術研究進展與展望[J]. 航空學報, 2016, 37(10): 2895-2908. DOI:10.7527/S1000-6893.2015.0351.
- [5] 李兆哲, 廖胤齊. GNSS+INS 組合在周跳探測中的技術研究[J]. 測繪通報, 2022(S2): 48-53. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0554.

版權聲明

© 2026 作者版權所有。本文依據“知識共用署名 4.0 國際授權合約”(CC BY 4.0)以開放獲取方式發佈。該許可允許使用者在任何媒介中自由使用、複製、傳播與改編文章(含商業用途),惟須明確署名原作者及出處,並注明所作修改(如有)。完整協議詳見:<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans>

出版聲明

所有出版物中的陳述、觀點及資料僅代表作者及供稿者個人立場,與 Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員無關。Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員對因內容所提及的任何理念、方法、說明或產品所導致的人身或財產損害概不負責。