

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Implementation of Vehicle Speed
Measurement Using Sound and Audio
Spectrum Analysis

實作聲音測速及音訊頻譜分析

專題領域：系統領域

組 別：B471

指導教授：劉奕汶

組員姓名：郭宇宸、許詠鈞

研究期間：113年03月01日至113年11月13日止，共8個月

摘要

本研究探討基於聲波特徵的車速測量技術，旨在提供低成本、非侵入性且靈活的聲音測速解決方案。利用聲波的都普勒效應結合現代訊號處理技術（如快速傅立葉變換 FFT 和短時傅立葉變換 STFT），分析車輛行駛時的聲音特徵，並利用迴歸分析探討車速與其聲音特徵的相關性。實驗通過麥克風收集普通重型機車在30至90 km/h 不同行駛速度下的聲音樣本，提取音訊中的頻率峰值與能量分布，並分析能量曲線的時間間隔特性。研究發現，頻率和能量隨車速增加而上升，時間間隔則呈負相關，這些參數為車速預測提供了核心依據。進一步通過多元迴歸建模，驗證頻率、能量與時間間隔對車速的高度解釋能力，模型的 R 平方值達到 0.979，展現良好的預測精度。研究結果證實了基於聲音測速技術的可行性，並展示了其在智慧交通、聲音監測等領域的應用潛力。未來可結合人工智慧與多聲道陣列技術，提升模型的精度與適用性，為低成本、高效的車速監控系統開闢新可能性。

研究動機與背景

隨著智慧城市與物聯網的快速發展，環境聲音監測的重要性日益凸顯。聲音測速技術基於聲音的都普勒效應，能有效分析交通流量，並辨識特定移動聲源。相比傳統的雷達與光學感測技術，聲音測速系統具備低成本、非侵入性和高靈活性的優勢，尤其適合多種應用場景。結合現代信號處理技術（如快速傅立葉變換 FFT 與短時傅立葉變換 STFT），此技術能高效分析聲音頻譜變化，並利用現有的錄音設備（如手機、監控裝置）進一步降低實現門檻。

此技術在教育、交通監控等領域展現出廣泛的應用潛力。例如，它可以用於智慧交通系統中的車速監測，或音樂教育中對聲音變化的即時測試。基於麥克風的測速系統不僅成本低廉，還可靈活擴展至多種設備平台，為多領域應用開啟新可能性，同時為低成本聲音監測提供了一個創新的解決方案。

研究目的

本研究旨在探討聲波在空氣中傳遞的物理特性，利用球狀麥克風進行聲音樣本的收集，並藉助 MATLAB 對音訊數據進行處理與分析。研究將比較聲速的理

論值與實驗測量值，評估其誤差並進一步分析影響聲速的環境因素，從而驗證聲速理論模型的準確性，並實現聲音測速的目標。

研究方法

我們選擇了一處半夜空曠且環境噪音較低的道路旁作為實驗場地，並架設麥克風進行聲音樣本的錄製。實驗中，我們以普通重型機車為對象，在不同的行駛時速下（例如時速30至90公里不等）分別錄製其行駛過程中的音訊數據，確保樣本的多樣性與精確性。在收集到足夠的聲音樣本後，利用 MATLAB 軟體對錄製的音訊進行深入分析，提取如頻率、能量等關鍵參數。

接著，我們應用多元回歸分析對數據進行建模，並通過建立回歸方程，將音訊參數與機車行駛時速進行匹配與預測。最終，回歸模型不僅幫助我們預測不同音訊樣本對應的機車時速，還為未來聲音測速技術的應用提供了實驗依據與方法框架。

研究成果

（一）頻率的分析

關於頻率的分析，我們採用了音訊中振幅最大的頻率，作為普通重型機車經過麥克風時的特徵頻率。為此，我們使用 MATLAB 對錄製的音訊進行快速傅立葉變換（FFT，Fast Fourier Transform），將聲音訊號從時間域轉換到頻率域，以便更精確地觀察頻譜特性。

我們繪製振幅對頻率的頻譜圖，藉此展示不同頻率成分的強弱。接著，利用數學函式精確定位振幅峰值所在的頻率，並將該頻率作為普通重型機車經過時的主要特徵頻率。分析結果如圖(1)所示，展現了普通重型機車在不同時速下聲音頻率的分布情況。

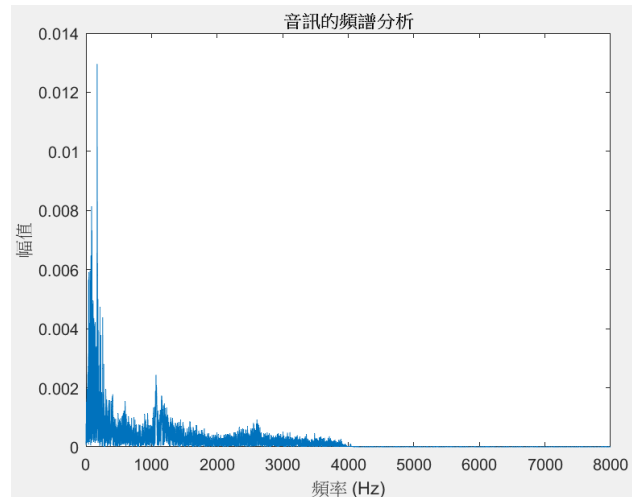


圖1 速度(50公里/小時)時振幅對頻率作圖

我們將不同時速下所測得的特徵頻率整理成表(1)，呈現速度與頻率之間的關係。從表格一中可以觀察到，隨著車輛行駛時速的逐漸增加，其特徵頻率也呈現上升的趨勢，這與我們一開始的預期結果一致。表格中的數據為後續回歸模型的建立和時速預測提供了重要支持。

表 1 不同時速下所對應的頻率

時速(km/hr)	頻率(Hz)
30	127
40	159
50	170
60	176
70	176
80	210
90	219

(二) 能量的分析

關於能量的分析，我們將音訊數據劃分為多個短時框架（frame），以逐一計算每一框架的能量，從而分析音訊的能量分布。為了提升曲線的平滑度並減少因短時波動造成的干擾，我們應用了移動平均濾波器，隨後使用樣條插值技術生成更平滑的能量曲線，便於後續的分析，從圖(2)可看出樣條插植的效果。

接下來，我們針對最大能量的前後 0.5 秒，進行積分運算，從而計算出該區間內的總能量，通過面積的大小量化音訊的能量特性。這種方法能有效反映聲音在不

同時速下的能量變化，並為聲音特徵的提取及聲音測速的建模提供了重要依據。

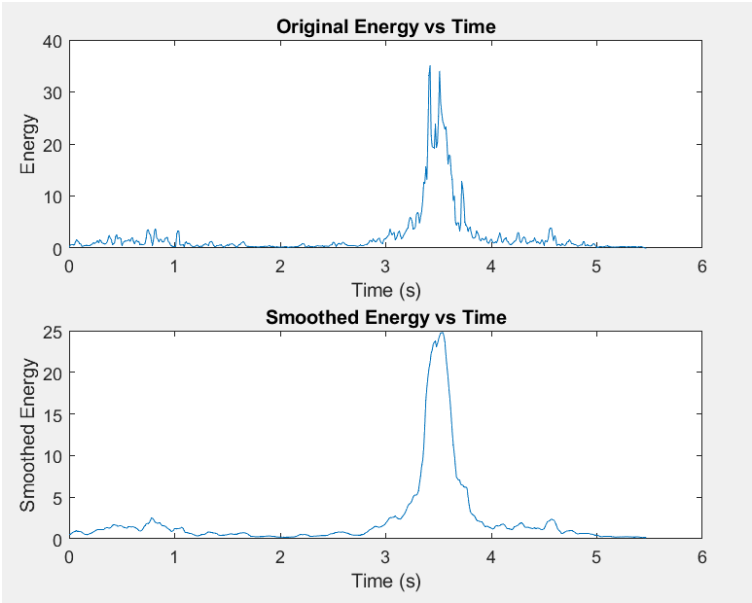


圖2 速度(50公里/小時)時能量隨時間分部圖

我們將不同時速下所測得的能量數據整理成表(2)，以直觀呈現速度與能量之間的關係。從表格中可以看出，隨著車輛行駛時速的增加，聲音能量大致呈現上升的趨勢，這與我們的初步假設相符。然而，在速度較低或較高的情況下，部分數據存在一定的偏差。我們推測，這些偏差可能是由於環境因素（如風速、背景噪音）或測量過程中的誤差所導致。

表 2 不同時速下所對應的能量大小

時速(km/hr)	能量
30	18.379
40	16.5001
50	24.6589
60	27.4263
70	29.1689
80	40.6072
90	35.8766

(三) 時間間隔的分析

我們利用第二部分中生成的能量分布圖，進行時間間隔的分析，選取最大能量值的50%作為閾值，並觀察能量曲線中高於該閾值的時間間隔。這些間隔反映了聲音強度隨時間變化的特性，與機車行駛速度密切相關。

分析結果顯示，隨著車輛時速的上升，時間間距如預期呈現下降的趨勢。這

代表車速越高，聲音能量集中分布的時間越短。表(3)呈現不同時速下的能量時間間距，為進一步研究速度與聲音的關係提供了有力支持。

表 3 不同時速下所對應的時間間隔

時速(km/hr)	時間間隔(s)
30	0.3
40	0.27
50	0.25
60	0.2
70	0.17
80	0.16
90	0.16

(四) 多元回歸分析

我們將上面得到的結果進行統整，利用 Excel 進行多元迴歸分析，利用表(4)中三個自變數(頻率、能量、時間間隔)預測一個應變數(時速)，其中各項結果均為取數筆樣本作平均的結果。

在表(5)中，我們的回歸分析 R 平方值表現良好，說明模型能有效捕捉聲音頻率、能量與車輛時速之間的關聯性。然而，仍有少量未解釋的變異可能來自測量誤差、環境因素（如風噪、背景聲音）或車輛本身的聲音特性差異。

在表(6)中，每個變數對應的迴歸係數，表示該變數對應變量的影響程度。其中截距為模型的常數項，時間間距的負係數顯著，可能是因為時間間距與車速成反比。

在表(7)中顯示大部分數據點的殘差值較小，說明模型的預測結果與實際值接近。整體來看，模型在不同速度區間的預測效果大致良好，絕大部分數據的殘差較小，標準化殘差在合理範圍內，顯示模型具有一定的可靠性。但在速度較高或極端情況下，殘差略大，未來可進一步優化模型，特別是在高速度區間的適配性上進行改進。

表 4 不同時速下所對應的頻率、能量與時間間隔

時速	頻率	能量	時間間距
30	127	18.379	0.3
40	159	16.5001	0.27
50	170	24.6589	0.25
60	176	27.4263	0.2
70	176	29.1689	0.17
80	210	40.6072	0.16
90	219	35.8766	0.16

表 5 迴歸統計數據

迴歸統計	
R 的倍數	0.989623
R 平方	0.979354
調整的 R 平方	0.958707
標準誤	4.389755
觀察值個數	7

表 6 迴歸直線係數

	係數
截距	42.77966
頻率	0.3017
能量	0.192286
時間間距	-191.853

表 7 殘差分析

觀察值	預測為 時速	殘差	標準化殘差
1	27.07364	2.926359	0.942762
2	42.12236	-2.12236	-0.68375
3	50.84695	-0.84695	-0.27286
4	62.78195	-2.78195	-0.89624
5	68.87263	1.127373	0.363197
6	83.24839	-3.24839	-1.04651
7	85.05407	4.945931	1.593392

結論

本研究探討了聲音特徵與車輛行駛時速之間的關聯性，並利用頻率、能量和時間間隔等聲學參數成功建立了多元回歸模型，驗證了基於聲音測速技術的可行性與實用性。

1. 研究成果總結

- **頻率分析**：隨車速增加，音訊中振幅最大的特徵頻率呈現上升趨勢，符合聲波都普勒效應的理論基礎，為模型的核心變數之一。
- **能量分析**：聲音能量隨車速上升而增強，雖然在低速或高速區間存在一定偏差，但整體趨勢與預期一致，表明能量可有效作為車速預測的輔助參數。
- **時間間隔分析**：隨車速增加，聲音能量集中分布的時間間隔逐漸減少，反映出車速對聲音持續性的顯著影響，是模型中關鍵的負相關變數。
- **多元回歸模型**：回歸分析結果顯示，頻率、能量和時間間隔三個自變數與車速具有高度相關性，模型的 R 平方值達到 0.979，表明該模型能解釋約 97.9% 的數據變異，具備良好的預測能力。

2. 模型的優勢與局限

本研究所建立的模型在中低速範圍內表現良好，能有效預測車輛的行駛時速，且絕大部分數據的殘差較小，標準化殘差在合理範圍內。然而，在高速度區間，由於背景噪音、風速等環境因素或聲音特徵的非線性影響，模型的預測精度稍有下降，部分數據殘差偏大。未來研究可透過優化數據收集環境、增加樣本數據，或採用非線性回歸方法進一步提升模型的適用性。

3. 技術應用前景

本研究展示了基於聲音測速技術的可行性與靈活性。由於其低成本、非侵入性和設備易得等優勢，該技術在智慧交通、教育場景及其他聲音分析應用中具有廣闊的發展潛力。未來可進一步開發基於聲音測速的實時監控系統，用於交通流量分析、車輛速度監測等場景。

4. 研究的意義與展望

本研究不僅驗證了聲音測速技術的理論基礎，還為聲音訊號處理與車速預測建立了實驗框架。未來可考慮結合人工智慧技術（如機器學習）及多聲道陣列的分析，探索更準確、更高效的測速模型，進一步提升該技術

的應用價值。

綜上所述，本研究為聲音測速技術的實現與應用提供了重要參考，並為低成本聲音監測系統的開發奠定了理論與實驗基礎。

心得感想

在這個專題開始時，我們與劉奕汶老師每兩個星期會進行一次 Meeting，內容多為討論 paper 或是共同討論碩班學長正在做的題目，讓我們對這領域有更多的了解，老師會針對報告內容延伸補充，也會針對我們的盲點提出問題讓我們自己找答案、提供方向讓我們思考。進入到下半學期，我們先決定好題目的方向並開始實作，採集了許多音訊的樣本，整理並分析在每個禮拜的 Meeting 向教授匯報進度，教授也會提供我們一些音訊分析技巧，以及可以改善精進的方向。做完這個專題後，我們對音訊處理的領域有了更進一步的了解，也期待聲音測速在未來能結合其他領域有更進一步的突破。