



自動化語音分析於華語研究之應用： 運用語言環境分析系統 (LENA system) 研究之啟示與建議

何文君¹ 張鑑如^{2*}

摘 要

語言環境分析系統 (Language ENvironment Analysis System, LENA system) 是一套結合穿戴式錄音裝置和自動化語音處理科技的新研究工具，美國學者應用此工具於兒童語言研究已多年，並獲得一些研究成果。這些研究成果證實了自動化語音處理科技，對兒童語言研究領域的貢獻。然而，應用語言環境分析系統於兒童華語的研究尚在起步中。本文目的在提供語言環境分析系統相關資訊，並為未來研發華語自動化語音分析工具，及採用語言環境分析系統之研究提供建議。文中主要內容如下：(1) 語言環境分析系統之簡介。(2) 研發華語自動化語音分析工具之啟示。(3) 應用語言環境分析系統於華語研究之建議。希冀本文能為華語語言研究引發新觀點及新突破。

關鍵詞：語言環境分析系統、華語、兒童語言、語音信號處理

何文君，國立臺灣師範大學人類發展與家庭學系博士，明新學校財團法人明新科技大學幼兒保育系講師

電子郵件：pchlinese@gmail.com

* 張鑑如 (通訊作者)，國立臺灣師範大學人類發展與家庭學系教授

電子郵件：changch2@ntnu.edu.tw

投稿日期：2019年5月20日；修正日期：2019年11月26日；接受日期：2020年8月5日



APPLYING AUTOMATED SPEECH ANALYSIS TO CHINESE LANGUAGE STUDIES: INSPIRATIONS AND SUGGESTIONS FROM STUDIES WITH THE LANGUAGE ENVIRONMENT ANALYSIS SYSTEM

Wen-Chun Ho¹ Chien-Ju Chang^{2*}

ABSTRACT

The Language ENvironment Analysis (LENA) System is a new research tool that combines a wearable digital recorder and automated speech signal processing technology. The LENA system has been employed by US researchers in the field of child language development for many years. Studies using the LENA system have confirmed the contribution of automated speech signal processing technology to language research; however, the LENA system has infrequently been applied in Chinese language research. This article introduces the LENA system and provides suggestions for its use in future Chinese language research. This article comprises three parts: (1) introduction to the LENA system; (2) inspiration for the developing Chinese automated speech analysis tool; (3) suggestions for Chinese language studies using the LENA system. It is hoped that this article can bring up some new viewpoints and breakthroughs for Chinese language research.

Keywords: Language ENvironment Analysis System, Chinese, child language, speech signal processing

Wen-Chun Ho, Doctor, Department of Human Development and Family Studies, National Taiwan Normal University, Lecturer, Department of Early Childhood Education and Care, Minghsin University of Science and Technology.

E-mail: pclchinese@gmail.com

* Chien-Ju Chang (corresponding author), Professor, Department of Human Development and Family Studies, National Taiwan Normal University.

E-mail: changch2@ntnu.edu.tw

Manuscript received: May 20, 2019; Modified: November 26, 2019; Accepted: August 5, 2020

壹、前言

近年來，隨著人工智慧技術的發展，在電腦硬體基礎、演算法和其他技術方面的進步，研發出許多人工智慧相關產品，應用在各領域。在資訊科學領域，語音辨識（speech recognition）技術已應用在生活中許多電子產品及軟體。語音辨識，指將語音訊號轉換成文字（張庭豪、洪孝宗、陳冠宇、王新民、陳柏琳，2015），不僅是說話聲音的辨識，而且是整個口語內容之辨識，因此，語音辨識也被認為應該稱作口語辨識（郭志忠、林奇嶽，2018）。語音辨識技術的理論基礎方面，主要的演算法為動態時間校正（Dynamic Time Warping, DTW）演算法、向量量化（Vector Quantization, VQ）方法、隱藏式馬可夫模型（Hidden Markov Model, HMM）及人工神經網路（Artificial Neural Network, ANN）等（柳春，2008）。近年來，語音辨識技術仰賴深度神經網路（Deep Neural Network, DNN）在音素識別和大量詞彙連續語音識別上獲得大突破（騰訊研究院、中國信通院互聯網法律研究中心、騰訊 AI Lab、騰訊開放平台、Zhineng，2017）。有關華語語音辨識的研究，也努力從不同層面切入來增加辨識率，例如：運用調變頻譜分解技術於強健語音辨識（張庭豪等人，2015）、探討室內長距離語音辨識技術（廖憲正、郭志忠、林政賢，2015）、使用字典學習法於強健語音辨識（顏必成、石敬宏、劉世弘、陳柏琳，2016）、融合多任務學習類神經網路聲學模型訓練於會議語音之辨識（楊明翰等人，2016）等。

語音辨識技術是將語音轉換為文字，可作為智慧型工具分析說話者語意之基礎。然而，對於語言研究者而言，蒐集的語言資料常來自於自然情境，其對話的速度較快，而且可能有多人對話或語音重疊等情況，這些都增加了語音辨識的困難度。特別是研究對象為幼兒時，語音辨識更為不易，因為幼兒常有口齒不清、疊字詞或童言童語等情況。幼兒語音辨識出的文字資料，仍需要大量人力加以修正，才能根據研究目的，選擇分析標的，再運用其他軟體，例如兒童語料交換系統（Child Language Data Exchange System, CHILDES），加以分析。

相對於語音辨識技術在語言研究之應用過程，本文介紹之工具為一套自動化分析系統，可蒐集錄音資料、直接運算和分析，產出研究者需要的

數據資料，過程中不需要人工加以處理。此套工具稱為語言環境分析系統（Language ENvironment Analysis System，簡稱 LENA system，本文以下簡稱 LENA），由美國 LENA 基金會（LENA Foundation）所研發。此套工具包含穿戴錄音設備及分析軟體，應用了語音自動處理技術，是一種相對較新的科技工具（Ganek & Eriks-Brophy, 2018b）。

LENA 為自動化的語音信號處理（Speech signal processing）工具，已在語言研究和實務應用中佔有一席之地（Greenwood, Schnitz, Irvin, Tasi, & Carta, 2018）。傳統的語料分析方式，不僅繁瑣，同時也耗費大量人力觀察、轉錄（transcribe）及分析，然而，電腦自動化語音信號處理技術，使得收錄及分析語言資料的方式有了巨大變化，也改變了兒童語言研究的視野（VanDam et al., 2016）。

LENA 設計初衷，是作為語言教育介入工具，藉由語音自動分析出兒童整日語言輸入量，具體回饋予父母，藉以增進親子間的語言交流互動，促進兒童語言及認知能力發展。隨著 LENA 被應用的研究議題越來越廣泛，越來越多研究採用 LENA 作為研究工具。自 2008 年 LENA 研發技術發表以來，使用 LENA 的大專院校、研究機構、醫院、聽障療育機構等，已超過 200 個。與 LENA 有關而發表之期刊文章、會議論文和會議海報等，也超過 300 篇（LENA Research Foundation, 2018）。

目前約有三篇文章，針對以 LENA 為工具的研究，進行文獻回顧分析。此三篇文章依各自設定的條件，選取與 LENA 相關的研究，並依不同目的，分析這些研究成果（Ganek & Eriks-Brophy, 2018b; Greenwood et al., 2018; Wang et al., 2017）。在文章特色方面，Wang 等人（2017）選取分析了 38 篇研究文獻，凸顯出 LENA 技術上的挑戰，以及探討 LENA 的實務應用和未來研究。Ganek 與 Eriks-Brophy（2018b）分析 44 篇文章，研究目的在讓語言發展研究人員和語言病理學家，瞭解 LENA 在研究中如何被運用，並分點說明採用 LENA 之研究的各個面向，例如：研究設計、資料收集與分析方式、研究對象等。Greenwood 等人（2018）選取 53 篇文章，從個別差異、跨語言、特殊兒童和相異情境等角度，檢視 LENA 分析不同族群和語言環境所呈現之研究結果。由於兒童語言能力與其家庭背景有關，即家庭背景間的差異造成兒童語言能力之差距，此研究也檢視以 LENA 作為家庭語言輸入的回饋工具時，縮小了多少這樣的差距。

上述三篇研究，各自系統性地分析 LENA 相關的文獻結果，但在華語研究方面，運用類似 LENA 的語音自動化分析工具的研究並不多。語音分析軟體為華語研究中較普遍被使用的工具，馬寶蓮與劉慶剛（2005）指出線上的語音分析軟體眾多，如：《桌上語音工作室（Mini Speech Lab）》、《可視語音操練（Visi Speech Class）》、Dr. Speech. Real Analysis 4.2、KAY Model 3700、Model 4400、Pitchworks、Speech Analyzer 等。然而，華語研究常用的語音分析軟體為 PRAAT: doing phonetics by computer（簡稱 PRAAT）。PRAAT 為多功能的聲學分析軟體，可對數位化的語音信號進行分析、標註、合成，產生聲學分析圖及報表（陳怡如、劉惠美，2010），可提供許多功能，如：語音分析、語音合成、語音標記與切割等（<https://www.fon.hum.uva.nl/praat/>），透過人工操作軟體，研究者可選擇想分析的語音項目，交由電腦執行分析，呈現聲學相關圖表。PRAAT 大多應用於發聲相關的聲學探究（陳怡如、劉惠美，2010；鄭明中，2016；鄭明中、張月珍，2015；簡子欣、陳淑瑜，2007），也可應用於語言教學相關的研究（黃佩芬、黃桂君、王小川、劉惠美，2006；鄭明中、郭淑珠，2013；廖淑慧、廖南雁，2010；鍾榮富、司秋雪，2009）。另外，研發華語自動化分析工具方面，尚未獲得足夠的關注，似乎投入的研究也不多，僅在華語教學研究出現相關的研究發表。例如：官英華與廖憲政（2009）介紹一套自動化華語聲調錯誤偵測系統，由 MIT、工業技術研究院以及國立臺灣師範大學合作發展，其研發目的在於幫助外國人學習華語聲調，並提供客觀及量化之語音資料分析模式。該系統聲調分析方法採用群聚分析演算法，可對學習者的口說語料進行聲調模式分析，分析結果能呈現學習者在發各種聲調時，錯誤之發聲型態。

相對於英語兒童的大量研究，語音自動化分析應用在華語方面，尚處於剛起步階段，需要許多投入，才能讓語音自動化分析落實在華語研究和實務應用上。LENA 為發展較早的語音自動化分析工具之一，已應用於語言相關研究及早期教育等領域，其研究成果及方向，可供未來欲運用 LENA 於華語之研究者參考，而其研發相關資訊，也可作為研發華語語音自動化工具之參考及借鏡。因此，本文後續內容，主要分為三部分：一，簡介 LENA。二，根據 LENA 研究報告及應用，對研發華語的語音自動化分析工具提出建議。三，依據 LENA 目前研究成果，建議華語研究可應用 LENA 之面向。

貳、LENA 簡介

一、LENA 緣起

LENA 緣起於 Hart 與 Risley (1995) 針對嬰幼兒早期語言學習歷程的重要研究。該研究長期觀察 42 個社會經濟背景不同的嬰幼兒家庭，研究期間從嬰幼兒 7 至 9 個月大開始，持續到 36 個月，每月收集各家庭 1 個小時的觀察和錄音資料。研究結果指出，孩子從出生到 3 歲時所聽到的成人說話的數量幾乎預測了兒童語言能力的變化，以及他們在幼兒園時的智商。家中成人和幼兒對話互動越多，幼兒日後的語言和認知能力表現也越好，同時證實幼兒早期語言發展對其日後發展的重要性。該研究也發現，幼兒所接觸到的語言刺激量因家庭背景而有巨大的差異，因而影響了幼兒語言和認知能力的發展；換言之，幼兒早期家庭中的語言輸入經驗，已決定幼兒語言和認知能力發展的幅度。為了縮小幼兒之間因語言刺激量，所造成幼兒語言能力發展之落差，後續研究致力於增進親子間的語言互動。為達此目的，父母需要具體且客觀的回饋，來促進親子間語言互動。但以 Hart 與 Risley 研究採用人工錄音和轉錄的方式，不只耗費時間和經費，更未能及時給予父母回饋。因此，促使 LENA 基金會推動研發自動化語音處理的技術，藉由電腦分析技術，擴大語言分析效能，以服務更多家庭。

二、LENA 組成

LENA 主要由可穿戴錄音機與自動語音分析軟體所組成。可穿戴錄音機又稱為數位語言處理器 (Digital Language Processor, DLP)，為重量極輕的小型錄音器，具高品質的錄音功能，可放置入特製的兒童衣服口袋中，收錄兒童周圍 6 到 10 英尺範圍內 16,000 赫茲的聲音 (Zhang et al., 2015)，錄音時間長達 16 小時 (Xu et al., 2008)。自動語音分析軟體，可將錄音資料進行自動分析，主要分析項目將於下段說明。

三、LENA 功能

LENA 分析軟體能提供兒童周圍環境中，各種不同面向的語音訊息，這些語音訊息以自動化數據方式呈現，包含自動分析出成人說話字數 (Adult Word Count, AWC)、對話輪替數 (Conversational Turn Count,

CTC)、兒童發聲計數(Child Vocalization Count, CVC)和自動化兒童發聲評估(Automatic Vocalization Assessment, AVA)。此外，還能分析兒童一天當中，所處的聽覺環境(Audio Environment, AE)，如：有意義話語、遠距及重疊話語、電視和電子音、噪音、靜默等聲音佔總錄音時間之百分比，並以報表圖方式呈現(LENA Research Foundation, 2012)。

進一步說明上述自動化數據指標。成人說話字數(AWC)即估計成年人在兒童近側清晰說話之字數量，軟體將清晰的成人說話片段區分為輔音和元音，使用驗證過的迴歸模型分析出字數。對話輪替數(CTC)，是計數成人和主要兒童發聲之間，一來一往的輪替次數，以靜默 5 秒為每回輪替計數停止標準，即計數發生於成人與兒童之間，不間斷之言語有關的聲音交替，這些聲音包含嬰兒的咕咕聲、尖叫聲和語詞等，軟體將自動過濾非言語相關的兒童聲音，如哭泣，呼吸和腸道蠕動聲，語音段重疊也不計入(Gilkerson et al., 2017; Arogan & Yoshinaga-Itano, 2012)。對話輪替數(CTC)，是兒童與成人之間互動的衡量標準，也是最能代表交流互動品質的自動化指標(Ambrose, Walker, Unflat-Berry, Oleson, & Moeller, 2015; Ambrose, VanDam, & Moeller, 2014; VanDam, Ambrose, & Moeller, 2012)。兒童發聲計數(CVC)則是計數兒童發聲之數量。自動化兒童發聲評估(AVA)則於下小節說明。

四、LENA 分析軟體之原理及準確率

LENA 分析原理主要根據 Xu 等人，在 2008 年發表之技術報告。兒童環境聲音頗為複雜，兒童環境聲音由數位語言處理器(DLP)錄製後，錄音資料須經由特定軟體分析。處理的第一步，是根據聲學特徵將聲音分類及定位，將實際環境錄音所有聲音歸入 8 類：目標兒童、成年男性、成年女性、其他小孩、電視(包括收音機和其他電子媒體聲音)、噪音、沉默和重疊。依著不同的目的，針對不同類別的聲學特徵聲音，採用不同的處理模式進行分割標記(Segmentation and Segment-ID Process)及計算。例如：識別說話者，採用最小持續時間高斯混合模型(Minimum Duration Gaussian Mixture Model, MDGMM)；語音分段處理及估算，採用知覺最小變異無失真響應(Perceptual Minimum Variance Distortionless Response, PMVDR)；成人說話字數估算方面，使用音素解碼(Phone-

decoding）、具有元音和輔音計數的最小平方法線性迴歸（Least-Squares linear regression）及非線性變體（Nonlinear variants）來進行計算。

軟體分析的準確度方面，將軟體分析 70 天的英文錄音結果，與人工轉錄比較，兩者之間的一致性比例頗高，成人說話字數（AWC）計數是 82%，電視是 71%，兒童發聲數（CVC）和其他類皆為 76%（Xu et al., 2008; Xu, Yapanel, & Gray, 2009）。華語分析的準確度方面，由 Gilkerson 等人（2015）在上海進行的研究驗證，其研究對象是 22 名 3 到 23 個月大的幼兒家庭，從 LENA 提供一天的家庭錄音，隨機選取一段 15 分鐘的錄音，由一位華語母語人士聽取標記說話者區域，並將成人說話語音轉譯為華語文字（Chinese character），與 LENA 提供的數值比較，LENA 系統和人類編碼相同比率在成人說話字數（AWC）為 79%，兒童發聲計數（CVC）為 81%。另外，在對話輪替計數（CTC）方面，去除 3 位異常值後，其計數結果與成人說話字數（AWC）表現相似。LENA 應用在不同國別語言之分析效度也被驗證，如：西班牙語（Weisleder & Fernald, 2013）、德語（Oller, 2010）、法語（Canault, Le Normand, Foudil, Loundon, & Thai-Van, 2016）、越南語（Ganek & Eriks-Brophy, 2018a）。

另外，自動化兒童發聲評估（AVA）方面，可自動生成兒童表達性語言發展（Expressive Language Development）的標準分數、發展年齡估計值及估計的平均語句長度（Estimated Mean Length of Utterance, EMLU）（Richards, Gilkerson, Paul, & Xu, 2008）。其技術原理關注焦點不在於一般所認為的語音識別及細節的準確性，而是在於估算結果能夠提供幼兒語言發展之訊息。以具有成人聲學模型的 Sphinx 音素解碼器，解碼語料庫中幼兒和成人語音，並測量每段錄音中兒童音素分佈與成人音素分佈之間的 Kullback-Leibler 分歧（大致距離），證實了隨著兒童年齡的增加，幼兒言語與成人言語之間的差異變小，驗證自動發聲評估結果可提供幼兒語言發展之訊息。效標效度方面，根據 243 位 2 個月到 48 個月美國幼兒，共 2124 次 12 小時的錄音結果分析，自動化兒童發聲評估（AVA）分析結果和幼兒生理年齡的相關程度高達 .90（Xu et al., 2008）。另一效標效度方面，則是與語言病理專家（speech language pathologist）的評比結果進行驗證，同樣針對年齡為 2 到 48 個月大幼兒，去除發展遲緩和發展超前的幼兒後，共 336 位，以自動化兒童發聲評估（AVA）分析 2910 次 12 小時的錄音結果，

與語言病理專家以標準化幼兒語言測驗評估幼兒語言發展評分，相關程度達 .72 (Xu et al., 2008)。換言之，自動化兒童發聲評估 (AVA) 已可從音素分佈估計兒童的發展年齡 (Richards et al., 2008)。最後，估計的平均語句長度 (EMLU) 是自動發聲評估 (AVA) 轉型的測量估計結果，代表兒童話語的複雜度。在效度方面，由人工轉譯 60 位幼兒的語料，幼兒月齡為 15 個月至 48 個月，分析之後得到了實際平均語句長度，其與估計的平均語句長度 (EMLU) 的相關達 .78 (Richards et al., 2008)。

由前述結果可知，自動化兒童發聲評估 (AVA) 分析幼兒一整天的自然語音資料，從中抽取出幼兒發聲的構成 (或複雜性)，並聯結了幼兒語言發展狀態，可作為幼兒語言發展之自動篩檢工具，提供給兒科醫生和其他專業人士參考。但是，其研究對象是母語為英語之幼兒，對於母語為華語之幼兒而言，其語言發展是否與英語幼兒類似，抑或有所差異，仍需要進一步大量收集華語幼兒語料加以分析，方可驗證。

五、LENA 研究運用範圍

LENA 能夠提供關於環境中各種不同面向的語音訊息，被用來蒐集與調查各種自然語言樣本，常見的研究對象為一般兒童或特殊兒童，應用的研究主題頗為廣泛，例如：聽障幼兒語言之研究 (Ambrose et al., 2014; Aragon & Yoshinaga-Itano, 2012; Caskey & Vohr, 2013; Sacks et al., 2014; VanDam et al., 2012; Vohr, Topol, Watson, Pierre, & Tucker, 2014)、自閉症幼兒語言之研究 (Burgess, Audet, & Harjusola-Webb, 2013; Irvin, Hume, Boyd, McBee, & Odom, 2013; Dykstra et al., 2012; Rankine et al., 2017; Warren et al., 2010; Woynaroski et al., 2016; Yoder, Oller, Richards, Gray, & Gilkerson, 2013)、幼兒語言能力的評估或篩檢 (Gilkerson, Richards, Greenwood, & Montgomery, 2017; Richards et al., 2017; Xu et al., 2014)、正常幼兒之親子談話互動 (Gilkerson et al., 2017; Greenwood, Thiemann-Bourque, Walker, Buzhardt, & Gilkerson, 2011; Ko, Seidl, Cristia, Reimchen, & Soderstrom, 2016; Weisleder & Fernald, 2013)、電視情境之研究 (Christakis et al., 2009; Zimmerman et al., 2009)、雙語情境之研究 (Jackson & Callender, 2014; Marchman, Martinez, Hurtado, Gruter, & Fernald, 2017; Ramirez-Esparza, Garcia-Sierra, & Kuhl, 2017)、幼兒語言環境比較 (Soderstrom &

Wittebolle, 2013）、跨文化比較之研究（Lee, Jhang, Relyea, Chen, & Oller, 2018），以及語言教育介入研究（Gilkerson, Richards, & Topping, 2017; Pae et al., 2016; Suskind et al., 2013; Zhang et al., 2015）等。

LENA 被應用於研究的議題越來越廣泛，而這些議題在過去侷限於常規測量的限制性，如：大量樣本、大量自然數據，人力難以在短時間分析。未來研究在研究對象和情境將會擴展。研究對象方面，除了發展正常兒童、特殊兒童外，將擴及成年人，而成年人則包括老年人，教師、非英語人士等；在情境方面，LENA 也可被應用於家庭以外的各種環境（Greenwood et al., 2018）。

六、應用 LENA 的華語研究

目前應用 LENA 於華語而發表的研究並不多，截至 2018 年，共三篇。一為 Zhang 等人（2015）在上海以 LENA 的自動分析數據，作為幼兒照顧者語言輸入量的回饋工具。另外一篇，同樣是在上海的研究，則為驗證 LENA 在華語分析的信度及效度（Gilkerson et al., 2015）。最新一項研究，運用 LENA 對英語和華語嬰兒進行整日的家庭錄音，分析不同語言文化環境和嬰兒牙牙語（Canonical babbling）發展的交互作用（Lee et al., 2018）。

七、LENA 之限制與挑戰

雖然 LENA 的語音識別演算法在兒童自動語音分析中獲得了巨大的突破，目前 LENA 的演算法仍有其限制與挑戰存在。以下從設計本質、語音收錄及演算法分析、研究對象和環境因素等方面說明。

LENA 設計本質之先天限制方面，LENA 只有收錄語音，沒有影像錄影，因此透過手語溝通之對象並不適用（Dykstra et al., 2012），運用在幼兒教室中也未具有自動識別環境位置的能力（Irvin et al., 2017）。軟體分析效度方面，要求錄音時間時至少需 10 小時，才具有效度，Dykstra 等人（2012）則指出，LENA 應用到教室環境錄音分析時，若每天幼兒待在教室的時間不足 10 小時，則無法達到其錄音時數的要求。LENA 設計的穿搭裝備方面，儘管 LENA 的特製服裝經過嚴格的測試，但織物吸聲率也可能影響準確性（Xu, Yapanel, & Gray, 2009）。

語音收錄及演算法分析方面，可從對話者、語音內容意義分析和聲音辨識等三個面向說明。對話者方面，LENA 無法區分所收錄的成人語言是對幼兒說話，或是對他人說話，因此，LENA 也無法區分周圍環境中幼兒側聽到的言語（Canault et al., 2016; Greenwood et al., 2018）。語音內容意義分析方面，LENA 的數據結果是運用演算法分析語音而得，並無法分析語言內容的部分，如詞彙多樣性、語法複雜度、溝通意圖等，也無法記錄人際互動中非語言訊息的部份（Ambrose et al., 2014; Canault et al., 2016; Dykstra et al., 2012），再者，LENA 的演算法在多種語言之下，也不能區分不同語言，再產出自動化分析數據。聲音辨識方面，Gilkerson 等人（2015）認為 LENA 對於環境聲音的辨識可再提升，因為演算法可能混淆電子音、高頻女性成人語音和兒童語音。另外，若在戶外情境下，LENA 的演算法也可能將鳥聲錯誤歸類為女性的聲音（Canault et al., 2016）。

研究對象方面，研究對象的個人特質或是群組屬性可能造成分析的誤差。舉例，若研究對象有仿說之特徵或習慣，此特徵可能使 LENA 演算法在分析與兒童發聲（CVC）有關之自動化指標，出現過高情形（Dykstra et al., 2012）。又如，兒童若有自語的習慣，而一旁的成人長時間講電話，LENA 演算法分析出的對話輪替數（CTC）將偏高。另外，LENA 分析效度方面，樣本年齡介於 2 個月到 48 個月，年齡小於 2 個月之嬰兒數量較少，若研究對象為新生兒，其自動化分析結果的效度，可能須再進一步確認。

有些限制來自於收錄語音的環境因素，造成語音收錄困難或分析的誤差。在吵雜環境中，LENA 軟體的分析效度受到影響，難以從吵雜的環境中抽取出人類的語音；某些情況下（例如：洗澡時間、炎熱的天氣條件），錄音設備無法按建議方式穿戴，使得研究對象的語言與其他語音識別出現問題（Canault et al., 2016）。Zhang 等人（2015）也在文章中提出，在炎熱天氣下，會有幼兒難以忍受穿戴背心而脫下，造成錄音失敗的情況。

雖然 LENA 目前存有上述挑戰，但研究工具各有其優缺點，也未曾有一個研究工具可以盡善盡美。了解 LENA 具有的限制，將有助於工具的使用、研究設計及研究結果的分析與詮釋。

參、研發華語自動化語音分析工具之啟示

自動化語音分析涵蓋的面向廣泛，可以包含語音辨識、聲學分析或未來可能發展的其他層面。然而，研發分析工具過程並不容易，需要投注許多人力與資源，以及多元領域專業人員合作，其複雜程度不言可喻，也非一篇文章能完整論述。因此，本部分主要以研究工具使用者之角度，提供發現與建議。

一、跳脫機器模擬人類聽語能力觀點，與機器智能合作

Xu 等人（2008）研發 LENA 分析軟體時，強調此軟體與一般認為的語音識別不同，細節的準確性並非最終目標，重要在於經由聲學模型來定義或劃分音素的組成或分佈，以提供兒童語言能力發展之訊息。根據此觀點，運用語音自動分析於華語研究時，可跳脫機器模擬人類理解語音之模式，而是以機器智能觀點，提供華語所需要的研究資訊。VanDam 等人（2016）也指出，應用人工智慧技術進行分析方面，可將語料庫中的語料輸入至有監督或無監督機器學習系統中，特別是無監督的深度學習神經網絡演算法，此分析方法已漸漸被認為可有效提取聲學特徵。換言之，透過跨領域合作，根據華語過去研究理論為基礎，提出指標需求，運用電腦演算法結果和實際測量的相關性，發展出可靠、具發展或教育意義的自動化指標，方可有助於實務上的應用。

二、思考語音自動分析工具之局限及華語特性，找出具代表性自動化指標

發展具有意義的參數時，須考慮語音自動分析工具在設計和應用上的侷限性，以及華語本身的特性，例如：一字一音、聲調語言等，找出最具代表性的自動化指標。以 LENA 研究結果為例，成人說話字數（AWC）和對話輪替數（CTC）都是 LENA 的自動化數據，常被用來了解幼兒環境之語言輸入量。Hart 與 Risley（1995）透過觀察和人工轉譯語料的研究結果，指出成人說話字數對幼兒語言發展具有重要意義，然而 Greenwood 等人（2011）運用 LENA 重複 Hart 和 Risley 的研究，研究結果卻指出，運用 LENA 產生的成人說話字數（AWC），和幼兒語言能力沒有關係，只有成人與幼兒對話輪替數（CTC）和幼兒語言能力有關，後續運用 LENA

的研究也只肯定對話輪替數（CTC）和幼兒語言能力間的關係（Ambrose et al., 2014; VanDam et al., 2012; Zhang et al., 2015）。Ambrose 等人（2015）認為此結論和過去研究結果的差異，在於研究方法的限制，即 LENA 作為研究工具之限制，LENA 在成人說話字數（AWC）方面，並無法區分幼兒對於成人語言關注程度，但對話輪替數（CTC）卻可以，因其需要成人和幼兒共同投入，所以可看出其與幼兒語言能力之相關性。因此，運用語音自動分析工具發展華語研究參數時，仍需留意語料收集、軟體分析之演算法設計或是華語特性等相關因素造成之影響，並試著找出具有語言發展或研究意義的自動化指標。

三、華語語料收集、分享、研究運用

發展華語語音自動分析軟體，檢定信度及效度為不可或缺之步驟，大量語料之收集可有助於分析軟體之信度及效度建立。然而，同時建立語料的存放資料庫亦為重要，可以參考 Homebank 語料庫之方式，建立家庭語料庫。因語料蒐集極為不易，語料之共享有助於專業研究人員（如：兒科醫生，語言病理學家，兒童發展心理學家和其他研究人員等），節省耗時費力的語料收集工作，將精力集中於語言分析之上，促進相關研究的效益。

四、經驗轉移合作及功能延展

一項產品成功的研發，必定具有許多錯誤嘗試的經驗，為避免重蹈覆轍，促進研發及應用效率，可與國外已具有研發成果之單位，商議合作及授權，求取研究技術經驗轉移，立基於較完善之研究技術之上。由於此工具設計為人體的長時間穿戴裝置，安全性為工具研發的首要基本條件，亦可參考國外安全認證規範。

依據華語之特性或研究需求，開發研究工具時，除了改進已開發工具演算法之不足，還須消極地避免國別文字、作業軟體自動升級等方面，對程式的影響，更需積極地建立新科技軟體間的相容與對話，相關程式設計軟體，例如 Python、MATLAB、R-scripts 等（Odean, Nazareth, & Pruden, 2015），同時思考建置雲端運算的可行性與必要性。

肆、應用 LENA 於華語研究之建議

一、利用 LENA 各項功能，突破過去華語研究蒐集語料之侷限

LENA 具有許多功能，這些功能可以協助研究者選取目標語料，突破過去傳統蒐集語料之限制。LENA 收錄時間長，可蒐集生活中各種自然語言樣本，涵蓋嬰幼兒家庭生活中各種活動，如：看電視、打掃、親子共讀、搭車、拜訪朋友等。而且，LENA 以圖示化呈現分析結果，其圖示之橫軸為時間軸，縱軸為自動化指標，如：成人說話字數（AWC）、對話輪替數（CTC）、兒童發聲計數（CVC）或聽覺環境各細項百分比，方便語料之選取。研究者可任意撥放每五分鐘錄音時段，因此，可根據研究目的，選取生活中特定活動或時間點，或參考 LENA 演算法提供的數據，選取錄音時段，對語言內容進行深度分析。以 Ramirez-Esparza 等人（2017）針對雙語嬰兒的研究為例，此研究主題為雙語（西班牙及英語）嬰兒的早期社會互動對日後語言發展的影響，運用 LENA 蒐集嬰兒 4 天的語料，獲得嬰兒大量自然情境中的互動資料，該研究根據 LENA 演算法計算之成人說話字數（AWC）結果，來協助研究者選取嬰兒與成人具有互動的語音段落，進行社會互動的轉譯編碼。運用 LENA 可輕易除去大量噪音、靜默或無互動時段，獲得自然的語言互動資訊。

除了直接應用 LENA 演算法所生成的數據進行研究外，亦可應用 LENA 原有蒐集語音、切割、分類、計算等功能，依研究目的撰寫程式語言，導入數據資料，發展所需模型，創建新功能。以 Wang、Pan、Miller 與 Cortina（2014）的研究為例，其研究目的希望為課室活動提供自動化分類的回饋，課室活動分為三類：教師講課、全班級討論和小組討論。該研究運用 LENA 中語音辨識系統所產生的參數，作為分類演算法的數據，形成模型，並將模型判斷結果與人工編碼進行相關度比對，各活動類型相關達 .86~.94，建立了有效分析模型。

二、應用於華語兒童語言發展之篩檢與評估

LENA 自動分析功能中，自動化兒童發聲評估（AVA）是重要功能之一，此功能有助於早期發現疑似語言遲緩的幼兒，而早期發現正是語言遲緩幼兒接受療育成效的重要關鍵。目前臨床上，對於三歲以前幼兒語

言能力的發展，仰賴家長報告和臨床環境中約 30 至 90 分鐘的觀察時間 (Richards et al., 2008)。然而，與傳統測量相比，LENA 更貼近自然情境，在瞭解幼兒語言發展的任務方面，具有突破人力限制，及真實有效記錄數據的優勢 (Greenwood et al., 2018)。過去多年來，美國運用 LENA 蒐集與分析大量英語幼兒從二個月到四歲的發聲語料，並已驗證自動化兒童發聲評估 (AVA) 結果與幼兒年齡的相關性 (Xu et al., 2008)。Gilkerson 等人 (2017) 也驗證 LENA 演算法分析幼兒的發聲結果，可以區分正常幼兒、自閉症幼兒及語言發展遲緩幼兒。LENA 被應用於探究人際互動環境對自閉症兒童及其他神經發展障礙兒童的影響，也可以應用於評估和介入的研究和實務 (Warren et al., 2010)。換句話說，透過 LENA 分析得到的自動化兒童發聲評估 (AVA)，是基於長達一整天的自然家庭語音記錄，且是對兒童自然語言環境進行無障礙的觀察，與典型的臨床環境相比，可為孩子的實際能力提供了不同，且可能更準確的評估 (Richards et al., 2008)。此外，Gilkerson、Richards、Greenwood 與 Montgomery (2017) 的研究中，結合家長問卷報告和幼兒發聲溝通發展 (vocal communication development)，研發出三歲前幼兒語言評估的工具，稱為發展快照 (Development Snapshot)，具有良好的信度及效度，可作為父母對嬰幼兒語言介入的工具，以及密集性監測嬰幼兒語言發展。

訓練 LENA 演算法的語料來自英語幼兒，因此自動化兒童發聲評估 (AVA) 之結果，並不適合直接作為華語幼兒之語言發展參考。若希望語音分析工具具有評估華語幼兒語言發展之功能，可參照 LENA 研發過程，首先第一步便是要收集大量或足夠的華語幼兒語料，因為語料數量決定語言分析模型的準確度，而對象涵蓋出生到四歲幼兒日常發聲資料，甚至可擴展至年紀更大的兒童，作為華語兒童語言發展常模基礎，方可作為語言遲緩幼兒篩檢之指標，或是聽語療育幼兒語言發展之對照參考。除此之外，也可嘗試探究不同類別特殊幼兒之語言發展特徵，與 LENA 的自動化分析指標之關聯，並建立同類特殊幼兒之語料，抽取其語言發展特徵，例如：發音之發展。並運用機器學習概念，訓練電腦程式化分析，作為評估特殊幼兒語言發展之輔助工具。

三、華語嬰幼兒父母之語言教育介入

許多研究已證實，幼兒與成人話語互動的頻率越高，幼兒的語言能力越好（Ambrose et al., 2014; Caskey & Vohr, 2013; Greenwood et al., 2011; Hart & Risley, 1995; Romeo et al., 2018; Vohr et al., 2014; Weisleder & Fernald, 2013）。強化幼兒語言環境是研發 LENA 之初衷，LENA 在語言教育介入研究中，已被用作父母或照顧者對幼兒語言輸入的回饋工具（Ota & Austin, 2013; Suskind et al., 2013）。對於華語幼兒來說，也可運用 LENA 作為增進親子對話頻率的工具。除了探討其自動化指標回饋對父母語言輸入量的改變之外，更要關注成效的持續性。Zhang 等人（2015）在上海的研究結果指出，幼兒照顧者的語言輸入量，在研究介入後增加，原本語言輸入量較多的照顧者，在三個月後回歸基準線，但是，對於原本語言輸入量較少的父母，在介入後，語言輸入量明顯增加，且持續的時間較久。在韓國相似的研究，也指出原本語言輸入量較低的父母，透過此回饋方式，獲得較顯著的效果（Pae et al., 2016）。2017 年，Gilkerson、Richards 與 Topping 在美國的研究結果再度確認此結論，對孩子說話量原本就低於收案平均值的父母而言，教育介入獲得顯著的成效，相對的，對原本說話量高於平均值的父母，卻未有成效。這些研究不只呈現出介入的效果及持續性，也凸顯教育介入對不同族群的成效，特別需要介入的族群，是親子對話量少的族群，而找到此族群才具有研究介入的意義。此外，也可參考 Suskind 等人（2013）的研究，進行父母教育介入研究時，除了運用 LENA 作為語言輸入的回饋工具，也可參考行為改變策略理論，並提供父母賦能方案，教導父母如何與幼兒互動技巧與方法，以達有效提升親子間互動的品質。

四、探究華語兒童之語言環境及其相關因素

兒童自出生到三歲的語言環境，對其日後語言和認知能力的發展極為重要。設計 LENA 的目的之一，即是瞭解兒童周圍的語言環境，例如：噪音、電子音、靜默、成人說話量、兒童發聲量等。因此，可用 LENA 調查華語兒童生活中語言環境樣貌，其中成人與兒童對話互動的數量和頻率是調查的基礎工作，而語言環境中成人與兒童互動的相關因素也值得探究。以國外調查兒童語言環境之研究為例，Greenwood 等人（2011）調查 13

個月到 27 個月美國幼兒的語言環境變化情形，結果指出家庭間的對話互動量差異極大，此結論同於 Hart 與 Risley（1995）的研究。由於，LENA 分析軟體能區分成人男性和女性的聲音，在 Greenwood 等人的研究中也指出，幼兒家庭環境中，主要的語言輸入者為女性。

由於 LENA 收錄聲音的時間長，也可用於調查華語兒童整天生活中，不同時間點的語言環境變化情形。Greenwood 等人（2011）研究結果指出，家庭中成人對幼兒的說話量，隨著時間軸而有規律的傾向，從一早起床後呈現高峰，越靠近中午越減少，中午到達最低點，隨著時間越接近傍晚，說話量增加至高點。同時也發現幼兒一整天中，其對話的規律性與其日常活動有關聯。另外，依據 LENA 長時間錄音的功能，也可以用來調查華語兒童各活動所佔時間，及估算各種活動中成人與幼兒互動的數據。Soderstrom 和 Wittebolle（2013）的研究即運用 LENA，分析幼兒進行各種活動所佔的時間。

除了上述運用 LENA 調查華語幼兒語言環境之外，也可將調查所得的語言環境資料，進行比較研究。例如比較不同背景或族群的語言環境、比較發展正常幼兒和聽力障礙幼兒的語言環境（Aragon & Yoshinaga-Itano, 2012），亦可比較不同生活情境（例如：家庭和托育機構）之語言環境（Soderstrom & Wittebolle, 2013）等。

探究影響自然語言環境之相關因素方面，可以運用 LENA 探究華語兒童生活中與語言環境相關或影響的因素。舉例，Zimmerman 等人（2009）運用 LENA 作為研究工具之一，分析成人與幼兒互動與看電視之關聯，該研究調查了 275 名 2 至 48 個月的嬰幼兒，看電視時的親子互動，發現電視環境對嬰幼兒語言能力有負面影響，但其效果受到成人和幼兒對話頻率所調節。

五、結合不同領域研究工具，深度探究議題

跨領域結合是未來研究發展的趨勢，目前將 LENA 與新的研究測量工具相互結合之研究，正在進展中（Greenwood et al., 2018）。Odean 等人（2015）發表的文章即指出，LENA 的技術和眼球追蹤技術結合，可以從認知和環境角度，探討兒童語言發展之語言處理、理解和語言環境。因此，對於未來華語運用 LENA 的研究，除了前幾點提及的建議方向之外，

亦可結合不同領域之研究工具，例如：腦電圖儀、磁振造影（Magnetic Resonance Imaging, MRI）、眼動儀（eye-tracking）及其他數位研究工具等，為兒童複雜且交織的發展歷程，進行深度探究，提供更多元的研究證據。以 LENA 結合腦電圖儀為例，Harwood 等人（2017）的研究，運用 LENA 作為收集二及三歲幼兒生活語料的工具，探討了幼兒聽到語音改變時，事件相關電位（Event-Related Potential, ERP）的變化與幼兒語言能力間的關係。再如，以 LENA 結合功能性磁振造影（functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI）為例，Romeo 等人（2018）的研究，以功能性磁振造影（fMRI）蒐集 4 到 6 歲兒童聽故事時大腦的反應資料，結合 LENA 蒐集兒童家庭的語言環境，及以標準化語言測驗了解兒童的語言能力，藉這些數據探討兒童語言輸入量與神經機制間的關係，研究結果指出，成人與兒童的對話輪替數量（CTC）影響著神經語言處理，當兒童經歷的對話越多，在語言處理過程中對 Broca 區域的激活就越大；對話輪替次數（CTC）和語言能力的關聯中，此種神經模式具有 48% 解釋力。另外，此研究也指出，父母教育程度與兒童語言能力間的關係中，成人與幼兒的對話輪替數（CTC）具有顯著調節作用。藉此結論，可打破父母教育程度層級，對兒童語言認知能力發展的框架，找到教育介入的有效方法。由此可知，透過多種研究工具所呈現的訊息，帶來多面向的數據，可更細緻且深入地探討研究議題。

伍、結論

科技的進步與其應用，為研究領域帶來新趨勢。自動化語音信號處理技術已在國外的語言研究和實務應用方面，具有成果，然而應用在華語研究方面並不多。LENA 是一種結合穿戴式錄音裝置與自動化語音信號處理軟體的研究工具，國外運用 LENA 作為研究工具約有十餘年時間。本文統整分析運用 LENA 之相關研究，對研發華語語音自動化分析工具，及運用 LENA 於華語研究，提出建議。在研發華語語音自動化分析工具方面，根據其設計理念，建議可以跳脫機器模擬人類聽語能力觀點，採取機器智能視角，並思考語音自動分析工具之侷限，找出具華語代表性自動化指標。

在設計軟體時，亦可同時考慮日後華語語料收集、分享及運用的需求。然而，重新研發一項新產品，需要大量人力、經費與時間，或許透過經驗轉移之合作與授權，華語自動化語音分析工具能發展得更快速及完善。

運用 LENA 於華語研究之建議方面，由於 LENA 為功能強大的研究工具，華語研究能利用 LENA 各項功能，突破過去華語研究蒐集語料之侷限。兒童語言發展方面，LENA 可作為家庭中兒童語言教育之介入工具，也可再加以研發成為華語兒童語言發展之篩檢或評估輔助工具。探究華語兒童的語言環境時，可運用 LENA 收集兒童不同環境的語言樣貌，加以比較或探究。運用 LENA 之新趨勢方面，傾向結合不同領域研究工具或是數位工具，提供多種數據，多維度探究議題。最後，希冀本文可為華語相關領域研究者引發新觀點或啟發研究靈感。

致謝

本文感謝審查委員提供寶貴意見、國立臺灣師範大學人類發展與家庭學系提供 LENA 設備及科技部（計畫編號：MOST 109-2410-H-003 -055 -MY3）之經費補助。

參考文獻

- 官英華、廖憲正（2009）。自動化華語聲調錯誤偵測系統之初探。*中原華語文學報*，4，117-137。
- [Guan, Y. H., & Liao, H. C. (2009). An automatic Mandarin tonal error-detection system: The preliminary results. *Chung Yuan Journal of Teaching Chinese as a Second Language*, 4, 117-137.]
- 柳春（2008）。語音識別技術研究進展。*甘肅科技*，24(9)，41-43。
- [Liu, C. (2008). Research progress of speech recognition technology. *Gansu Science and Technology*, 24(9), 41-43.]
- 陳怡如、劉惠美（2010）。高功能自閉症兒童情緒語調的表達。*特殊教育研究學刊*，35(2)，55-79。
- [Chen, Y. R., & Liu, H. M. (2010). The verbal intonation of expressive emotion in elementary school children with high-function autism. *Bulletin of Special Education*, 35(2), 55-79.]
- 馬寶蓮、劉慶剛（2005，6月）。以Praat語言分析軟體應用於華語語音教學法初探。第四屆全球華文網路教育研討會。「第四屆全球華文網路教育研討會」發表之論文，國立臺灣科學教育館。
- [Ma, B. L., & Liu, C. K. (2005, June). *Application of Praat software in Chinese phonetic teaching: The preliminary study. Paper presented at the 4th International Conference on Internet Chinese Education*. National Taiwan Science Education Center.]
- 郭志忠、林奇嶽（2018）。誤解與挑戰：從語音辨識到口語理解。*電腦與通訊*，174，35-56。
- [Kuo, C. C., & Lin, C. Y. (2018). Misunderstanding and challenge: From speech recognition to speech understanding. *Journal of Information and Communication Technology*, 174, 35-56.]
- 張庭豪、洪孝宗、陳冠宇、王新民、陳柏琳（2015）。調變頻分解技術於強健語音辨識之研究。*中文計算語言學期刊*，20(2)，87-105。
- [Chang, T. H., Hung, H. T., Chen, K. Y., Wang, H. M., & Chen, B. (2015). Investigating modulation spectrum factorization techniques for robust speech recognition. *Computational Linguistics and Chinese Language Processing*, 20(2), 87-105.]
- 黃佩芬、黃桂君、王小川、劉惠美（2006）。以語音聽力檢測系統輔助聽障兒童發音教學實驗。*特殊教育研究學刊*，31，115-137。
- [Huang, P. F., Huang, K. C., Wang, H. C., & Liu, H. M. (2006). Using a speech audiometry system to improve the ability of speech discrimination and pronunciation in children with hearing impairment. *Bulletin of Special Education*, 31, 115-137.]

- 楊明翰、許曜麒、洪孝宗、陳映文、陳冠宇、陳柏琳（2016）。融合多任務學習類神經網路聲學模型訓練於會議語音辨識之研究。**中文計算語言學期刊**，**21**(2)，85-103。
- [Yang, M. H., Hsu, Y. C., Hung, H. T., Chen, Y. W., Chen, K. Y., & Chen, B. (2016). Leveraging multi-task learning with neural network based acoustic modeling for improved meeting speech recognition. *Computational Linguistics and Chinese Language Processing*, *21*(2), 85-103.]
- 廖淑慧、廖南雁（2010）。法語語者華語聲調習得之偏誤分析—從聲學觀點談起。**應華學報**，**8**，195-217。doi:10.6391/JAC.201012.0195
- [Liao, S. H. & Liao, N. Y. (2010). An analysis on the errors of the French speakers in learning the Chinese tones based on the concept of acoustics. *Journal of Applied Chinese*, *8*, 195-217. doi:10.6391/JAC.201012.0195]
- 廖憲正、郭志忠、林政賢（2015）。室內長距離語音辨識技術挑戰與初探。**電腦與通訊**，**164**，42-54。
- [Liao, H. C., Kuo, C. C., & Lin, C. H. (2015). Challenges and preliminary study on indoor distant speech recognition. *Journal of Information and Communication Technology*, *164*, 42-54.]
- 鄭明中（2016）。卓蘭饒平客家話舌尖前音聲母顎化與否之聲學探究。**師大學報：語言與文學類**，**61**(1)，1-31。doi: 10.6210/JNTNULL.2016.61(1).01
- [Cheng, M. C. (2016). An acoustic exploration of whether alveolar onsets [ts], [ts^h], [s] are palatalized in Zhuolan Raoping Hakka. *Journal of National Taiwan Normal University*, *61*(1)，1-31. doi: 10.6210/JNTNULL.2016.61(1).01]
- 鄭明中、郭淑珠（2013）。東勢大埔客家話兒向語與成人語擦音的聲學比較：兼談對華語文教學研究的啟示。**華語文教學研究**，**10**(4)，1-45。
- [Cheng, M. C., & Kuo, S. C. (2013). An acoustic comparison of the fricatives in infant-directed speech and adult-directed speech of Dongshi Hakka and its inspirations to the study of Chinese teaching and learning. *Journal of Chinese Language Teaching*, *10*(4), 1-45.]
- 鄭明中、張月珍（2015）。東勢客家話舌尖前音聲母顎化與否之聲學探究。**師大學報：語言與文學類**，**60**(1)，1-29。doi: 10.6210/JNTNULL.2015.60(1).01
- [Cheng, M. C., & Chang, Y. C. (2015). Acoustic exploration of whether alveolar onsets [ts], [ts^h], [s] are palatalized in Dongshi Hakka. *Journal of National Taiwan Normal University*, *60*(1)，1-29. doi: 10.6210/JNTNULL.2015.60(1).01]
- 鍾榮富、司秋雪（2009）。從發音與聲學的對比分析探討美國學生的華語擦音。**華語文教學研究**，**6**(2)，129-162。
- [Chung, R. F., & Si, Q. X. (2009). An acoustic contrastive analysis on an American learner's Mandarin fricatives. *Journal of Chinese Language Teaching*, *6*(2), 129-162.]

- 簡子欣、陳淑瑜（2007）。以發聲練習和聲調覺識為主的音樂訓練對聽覺障礙兒童國語聲調清晰度之成效研究。《**特殊教育研究學刊**》，32(2)，93-114。
- [Chien, T. H., & Chen, S. Y. (2007). The effect of music training on Mandarin tone intelligibility for children with hearing impairments. *Bulletin of Special Education*, 32(2), 93-114.]
- 顏必成、石敬弘、劉士弘、陳柏琳（2016）。使用字典學習法於強健性語音辨識。《**中文計算語言學期刊**》，21(2)，35-53。
- [Yan, B. C., Shih, C. H., Liu, S. H., & Chen, B. (2016). The use of dictionary learning approach for robustness speech recognition. *Computational Linguistics and Chinese Language Processing*, 21(2), 35-53.]
- 騰訊研究院、中國信通院互聯網法律研究中心、騰訊 AI Lab、騰訊開放平台、Zhineng, R. (2017)。《**人工智能**》。北京：中國人民大學。
- [Tencent Research Institute, Research Center for Internet Law of CAICT, Tencent AI Lab, Tencent Open Platform, & Zhineng, R. (2017). *Artificial intelligence*. Beijing, China: China Renmin University Press.]
- Ambrose, S. E., VanDam, M., & Moeller, M. P. (2014). Linguistic input, electronic media, and communication outcomes of toddlers with hearing loss. *Ear and Hearing*, 35(2), 139-147. doi:10.1097/AUD.0b013e3182a76768
- Ambrose, S. E., Walker, E. A., Unflat-Berry, L. M., Oleson, J. J., & Moeller, M. P. (2015). Quantity and quality of caregivers' linguistic input to 18-month and 3-year-old children who are hard of hearing. *Ear and Hearing*, 36(01), 48S-59S. doi:10.1097/AUD.0000000000000209
- Aragon, M., & Yoshinaga-Itano, C. (2012). Using Language ENvironment Analysis to improve outcomes for children who are deaf or hard of hearing. *Seminars in Speech & Language*, 33(4), 340-353. doi:10.1055/s-0032-1326918
- Burgess, S., Audet, L., & Harjusola-Webb, S. (2013). Quantitative and qualitative characteristics of the school and home language environments of preschool-aged children with ASD. *Journal of Communication Disorders*, 46, 428-439. doi:10.1016/j.jcomdis.2013.09.003
- Canault, M., Le Normand, M. T., Foudil, S., Loundon, N., & Thai-Van, H. (2016). Reliability of the Language ENvironment Analysis system (LENA™) in European French. *Behavior Research Methods*, 48(3), 1109-1124. doi: 10.3758/s13428-015-0634-8.
- Caskey, M., & Vohr, B. (2013). Assessing language and language environment of high-risk infants and children: A new approach. *Acta Paediatrica*, 102(5), 451-461. doi:10.1111/apa.12195
- Christakis, D. A., Gilkerson, J., Richards, J. A., Zimmerman, F. J., Garrison, M. M., Xu, D., & ... Yapanel, U. (2009). Audible television and decreased adult words, infant vocalizations, and conversational turns: A population-based study. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 163(6), 554-558. doi:10.1001/archpediatrics.2009.61

- Dykstra, J. R., Sabatos-DeVito, M. G., Irvin, D. W., Boyd, B. A., Hume, K. A., & Odom, S. L. (2012). Using the Language Environment Analysis (LENA) system in preschool classrooms with children with autism spectrum disorders. *Autism, 17*(5), 582-594. doi:10.1177/1362361312446206
- Ganek, H. V., & Eriks-Brophy, A. (2018a). A concise protocol for the validation of language ENvironment analysis (LENA) conversational turn counts in vietnamese. *Communication Disorders Quarterly, 39*(2), 371-380. doi:10.1177/1525740117705094
- Ganek, H., & Eriks-Brophy, A. (2018b). Language ENvironment Analysis (LENA) system investigation of day long recordings in children: A literature review. *Journal of Communication Disorders, 72*, 77-85. doi:10.1016/j.jcomdis.2017.12.005
- Gilkerson, J., Richards, J. A., & Topping, K. (2017). Evaluation of a LENA-based online intervention for parents of young children. *Journal of Early Intervention, 39*(4), 281-298. doi:10.1177/1053815117718490
- Gilkerson, J., Richards, J. A., Greenwood, C. R., & Montgomery, J. K. (2017). Language assessment in a snap: Monitoring progress up to 36 months. *Child Language Teaching and Therapy, 33*(2), 99-115. doi:10.1177/0265659016660599
- Gilkerson, J., Richards, J. A., Warren, S. F., Montgomery, J. K., Greenwood, C. R., Oller, D. K., . . . Paul, T. D. (2017). Mapping the early language environment using all-day recordings and automated analysis. *American Journal of Speech - Language Pathology, 26*(2), 248-265. doi:10.1044/2016_AJSLP-15-0169
- Gilkerson, J., Yiwen, Z., Dongxin, X., Richards, J. A., Xiaojuan, X., Fan, J., & ... Topping, K. (2015). Evaluating Language Environment Analysis System performance for Chinese: A pilot study in Shanghai. *Journal of Speech, Language & Hearing Research, 58*(2), 445-452. doi:10.1044/2015_JSLHR-L-14-0014
- Greenwood, C. R., Schnitz, A. G., Irvin, D., Tasi, S. F., & Carta, J. J. (2018). Automated Language Environment Analysis: A research synthesis. *American Journal of Speech-Language Pathology, 27*(2), 853-867. doi:10.1044/2017_AJSLP-17-0033
- Greenwood, C. R., Thiemann-Bourque, K., Walker, D., Buzhardt, J., & Gilkerson, J. (2011). Assessing children's home language environments using automatic speech recognition technology. *Communication Disorders Quarterly, 32*(2), 83-92. doi: 10.1177/1525740110367826
- Hart, B., & Risley, T. R. (1995). *Meaningful differences in the everyday experience of young American children*. Baltimore, MD: Brookes.
- Harwood, V., Preston, J., Grela, B., Roy, D., Harold, O., Turcios, J., . . . Landi, N. (2017). Electrophysiology of perception and processing of phonological information as indices of toddlers' language performance. *Journal of Speech, Language and Hearing Research, 60*(4), 999-1011. doi: 10.1044/2016_JSLHR-L-15-0437
- Irvin, D. W., Crutchfield, S. A., Greenwood, C. R. Simpson, R. L., Sangwan, A., & Hansen, J. H. L. (2017). Exploring classroom behavioral imaging: Moving closer to effective and data-based early childhood inclusion planning. *Advances in Neurodevelopmental Disorders, 1*(2), 95-104. doi: 10.1007/s41252-017-0014-8

- Irvin, D. W., Hume, K., Boyd, B. A., McBee, M. T., & Odom, S. L. (2013). Child and classroom characteristics associated with the adult language provided to preschoolers with autism spectrum disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders, 7*(8), 947-955. doi:10.1016/j.rasd.2013.04.004
- Jackson, C. W., & Callender, M. F. (2014). Environmental considerations: Home and school comparison of Spanish-English speakers' vocalizations. *Topics in Early Childhood Special Education, 34*(3), 165-174. doi: 10.1177/0271121414536623
- Ko, E., Seidl, A., Cristia, A., Reimchen, M., & Soderstrom, M. (2016). Entrainment of prosody in the interaction of mothers with their young children. *Journal of Child Language, 43*(2), 284-309. doi: 10.1017/S0305000915000203
- Lee, C. C., Jhang, Y., Relyea, G., Chen, L. M., & Oller, D. K. (2018). Babbling development as seen in canonical babbling ratios: A naturalistic evaluation of all-day recordings. *Infant Behavior and Development, 50*, 140-153. doi: 10.1016/j.infbeh.2017.12.002
- LENA Research Foundation (2012). *LENA Pro™ brochure*. Retrieved from: https://3ezaxq2cvfwhsrafg2qaq2p4-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/07/LTR-11-1_LENA-Pro-Brochure.pdf
- LENA Research Foundation (2018). *Research publications*. Retrieved from <https://www.lena.org/research/>
- Marchman, V. A., Martinez, L. Z., Hurtado, N., Gruter, T., & Fernald, A. (2017). Caregiver talk to young Spanish-English bilinguals: Comparing direct observation and parent-report measures of dual-language exposure. *Developmental Science, 20*(1), e12425. doi:10.1111/desc.12425
- Odean, R., Nazareth, A., & Pruden, S. M. (2015). Novel methodology to examine cognitive and experiential factors in language development: Combining eye-tracking and LENA technology. *Frontiers in Psychology, 6*, 1266. doi: 10.3389/fpsyg.2015.01266
- Oller, D. K. (2010). All-day recordings to investigate vocabulary development: A case study of a trilingual toddler. *Communication Disorders Quarterly, 31*(4), 213-222. doi: 10.1177/1525740109358628
- Ota, C. L., & Austin, A. M. B. (2013). Training and mentoring: Family child care providers' use of linguistic inputs in conversations with children. *Early Childhood Research Quarterly, 28*(4), 972-983. doi:10.1016/j.ecresq.2013.04.001
- Pae, S., Yoon, H., Seol, A., Gilkerson, J., Richards, J. A., Ma, L., & Topping, K. (2016). Effects of feedback on parent-child language with infants and toddlers in Korea. *First Language, 36*(6), 549-569. doi: 10.1177/0142723716649273
- Ramirez-Esparza, N., Garcia-Sierra, A., & Kuhl, P. K. (2017). The impact of early social interactions on later language development in Spanish-English bilingual infants. *Child Development, 88*(4), 1216-1234. doi:10.1111/cdev.12648
- Rankine, J., Li, E., Lurie, S., Rieger, H., Fourie, E., Siper, P. M., . . . Kolevzon, A. (2017). Language ENvironment Analysis (LENA) in Phelan-McDermid syndrome: Validity and suggestions for use in minimally verbal children with autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 47*(6), 1605-1617. doi: 10.1007/s10803-017-3082-8

- Richards, J. A., Gilkerson, J., Paul, T., & Xu, D. (2008). *The LENA™ automatic vocalization assessment* [Technical report no. LTR-08-1]. Boulder, CO: LENA Research Foundation. Retrieved from https://www.lena.org/wp-content/uploads/2016/07/LTR-08-1_Automatic_Vocalization_Assessment.pdf
- Richards, J. A., Xu, D., Gilkerson, J., Yapanel, U., Gray, S., & Paul, T. (2017). Automated assessment of child vocalization development using LENA. *Journal of Speech, Language and Hearing Research, 60*(7), 2047-2063. doi: 10.1044/2017_JSLHR-L-16-0157
- Romeo, R. R., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Beyond the 30-million-word Gap: Children's conversational exposure is associated with language-related brain function. *Psychological Science, 29*(5), 700-710. doi: 10.1177/0956797617742725
- Sacks, C., Shay, S., Repplinger, L., Leffel, K. R., Sapolich, S. G., Suskind, E., . . . Suskind, D. (2014). Pilot testing of a parent-directed intervention (project ASPIRE) for underserved children who are deaf or hard of hearing. *Child Language Teaching and Therapy, 30*(1), 91-102. doi: 10.1177/0265659013494873
- Soderstrom, M., & Wittebolle, K. (2013). When do caregivers talk? The influences of activity and time of day on caregiver speech and child vocalizations in two childcare environments. *Plos One, 8*(11), 1-12. doi:10.1371/journal.pone.0080646
- Suskind, D., Leffel, K. R., Hernandez, M. W., Sapolich, S. G., Suskind, E., Kirkham, E., & Meehan, P. (2013). An exploratory study of "quantitative linguistic feedback": Effect of LENA feedback on adult language production. *Communication Disorders Quarterly, 34*(4), 199-209. doi: 10.1177/1525740112473146
- VanDam, M., Ambrose, S. E., & Moeller, M. P. (2012). Quantity of parental language in the home environments of hard-of-hearing 2-year-olds. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 17*(4), 402-420. doi:10.1093/deafed/ens025
- VanDam, M., Warlaumont, A., Bergelson E., Cristia A., Soderstrom M., De Palma P., and MacWhinney, B. (2016). HomeBank: An online repository of daylong child-centered audio recordings. *Seminars in Speech and Language, 37*(2), 128-141. doi:10.1055/s-0036-1580745
- Vohr, B. R., Topol, D., Watson, V., St Pierre, L., & Tucker, R. (2014). The importance of language in the home for school-age children with permanent hearing loss. *Acta Paediatrica, 103*(1), 62-69. doi:10.1111/apa.12441
- Wang, Y., Hartman, M., Abdul Aziz, N. A., Arora, S., Shi, L., & Tunison, E. (2017). A systematic review of the use of LENA technology. *American Annals of the Deaf, 162*(3), 295-311.
- Wang, Z., Pan, X., Miller, K. F., & Cortina, K. S. (2014). Automatic classification of activities in classroom discourse. *Computers & Education, 78*, 115-123. doi: 10.1016/j.compedu.2014.05.010
- Warren, S. F., Gilkerson, J., Richards, J. A., Oller, D. K., Xu, D., Yapanel, U., & Gray, S. (2010). What automated vocal analysis reveals about the vocal production and language learning environment of young children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 40*(5), 555-569. doi: 10.1007/s10803-009-0902-5

- Weisleder, A., & Fernald, A. (2013). Talking to children matters: Early language experience strengthens processing and builds vocabulary. *Psychological Science*, 24(11), 2143-2152. doi:10.1177/0956797613488145
- Woynarowski, T., Oller, D. K., Keceli-Kaysili, B., Xu, D., Richards, J. A., Gilkerson, J., & Yoder, P. (2016). The stability and validity of automated vocal analysis in preverbal preschoolers with autism spectrum disorder. *Autism Research*, 10(3), 508-519. doi:10.1002/aur.1667
- Xu, D., Yapanel, U., Gray, S., Gilkerson, J., Richards, J., & Hansen, J. (2008, October). *Signal processing for young child speech language development*. Paper presented at the 1st Workshop on Child, Computer and Interaction, Chania, Crete, Greece.
- Xu, D., Yapanel, U., & Gray, S. (2009). *Reliability of the LENA™ Language Environment Analysis System in young children's natural home environment* [Technical report LTR-05-02]. Boulder, CO: LENA Foundation. Retrieved from http://www.lena.org/wp-content/uploads/2016/07/LTR-05-2_Reliability.pdf
- Xu, D., Richards, J. A., & Gilkerson, J. (2014). Automated analysis of child phonetic production using naturalistic recordings. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 57(5), 1638-1650. doi: 10.1044/2014JSLHR-S-13-0037
- Yoder, P. J., Oller, D. K., Richards, J. A., Gray, S., & Gilkerson, J. (2013). Stability and validity of an automated measure of vocal development from daylong samples in children with and without autism spectrum disorder. *Autism Research*, 6(2), 103-107. doi:10.1002/aur.1271
- Zhang, Y., Xu, X., Jiang, F., Gilkerson, J., Xu, D., Richards, J. A., ... Topping, K. J. (2015). Effects of quantitative linguistic feedback to caregivers of young children. *Communication Disorders Quarterly*, 37(1), 16-24. doi:10.1177/1525740115575771
- Zimmerman, F. J., Gilkerson, J., Richards, J. A., Christakis, D. A., Xu, D., Gray, S., & Yapanel, U. (2009). Teaching by listening: The importance of adult-child conversations to language development. *Pediatrics*, 124(1), 342-349. doi:10.1542/peds.2008-2267