

# 静かな車(Quiet Vehicle)の接近通知音設計のための音響心理学研究 ～ミュンヘン工科大での滞在を終えて～

生産科学研究科（工学部） 助教 山内 勝也  
(派遣期間：平成22年8月13日～平成23年1月21日)

今回、生産科学研究科の組織的な若手研究者海外派遣プログラム「環境・エコロジー・エネルギー分野の 先導融合科学をリードする若手研究者の育成」によってミュンヘン工科大に滞在し、共同研究の遂行と当地の研究者との多岐にわたる情報交換を行った。滞在中には、主に「静かな車(Quiet Vehicle)の接近通知音設計のための音響心理学的研究」を実施し、さらに滞在先研究室でのパターン認識、音楽情報処理関連研究の研鑽を深めた。接近通知音に関する研究においては、国連欧州経済委員会(UN/ECE)の担当部門会議への招聘も受け、国際的な活動領域を広めることができた。

滞在先研究機関の概要と、滞在中に実施した主な研究の内容と成果を紹介し、本プログラムによる滞在先を振り返る。

## 1. 滞在先研究機関の紹介

Technical University of Munich (*Technische Universität München*) has established in 1868. Its reputation as a foremost academic institution with 6 Nobel prizes and many other prestigious awards, making it repeatedly the number one German university in various rankings, including the most recent ones. Our university covers a large spectrum of fundamental and applied research with studies ranging from engineering, natural sciences, including life and medical sciences, to economics. Today TUM comprises 13 faculties with more than 25,000 students (about 20 percent of whom come from abroad), 460 professors, and roughly 6,500 academic and non-academic staff.





The institute that I have dispatched is Institute for Human-Machine Communication (*Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation*) which is established within the department electrical engineering and information technology (EE&IE). The institute focuses on novel techniques for an intuitive and natural interaction of humans with all types of computers and computer-controlled systems and machines. Their main competencies and research interests covers pattern recognition, signal processing, statistical classifiers and acoustics. The acoustic group of the institute is headed by by Professor Hugo Fastl as known as the one of the leading person on the psycho-acoustics in the world represented.

## 2. 研究内容と成果

近年、電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)などの次世代自動車が急速に普及しつつあるが、これらの自動車は環境にやさしいという特徴に加えて、動力源に由来する騒音が非常に少なく、内燃機関自動車よりも静かであるという特徴を有する。そのため、"Quiet Vehicle (静かな車)" などと呼ばれることがある。そして、静かであるが故に、歩行者が自動車の存在に気付くことが困難で危険であることが指摘されており、その対策として、従来の車と同程度の音を補償する装置の利用が各国で検討されている。その検討は、国連の担当作業部会で2012年末での国際的対策制定が目指されるなど、その検討は非常に性急である。現在、国連作業部会で検討されているガイドラインは、接近報知音の音量は「内燃機関のみを原動機とする車両が時速20kmで走行する際に発する走行音の大きさを超えない程度」と示されているが、この音量が実環境下で車両を認知するために十分な音量であるのか、もしくは音環境への影響がどの程度であるのかについて、明確に答えられる知見は存在していない。そこで今回、ドイツ在住者を対象として、バイノー

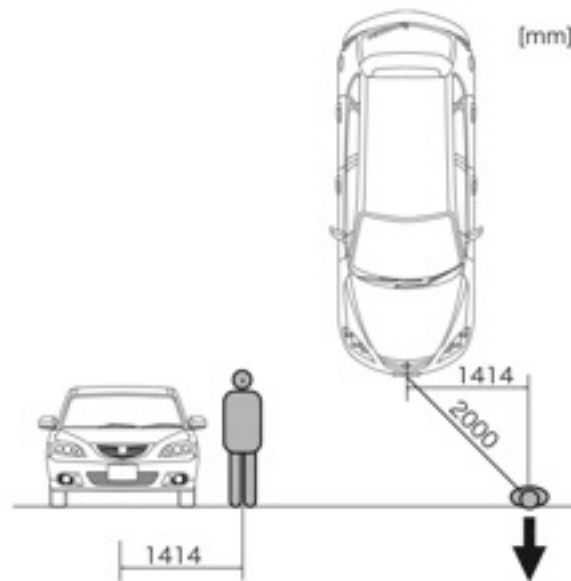


Figure 1 – Assumed relative position of a pedestrian and the vehicle providing warning sound.

ラル録音された接近報知音と環境音による各種環境音条件下での接近報知音の音量に関する音響心理実験を行った。

実験には、「エンジン音(Eng)」、「広帯域音(Bbs)」、「クラクション(Horn)」の3種類の接近報知音，ならびに4種類の環境音刺激を用いた。各刺激はHATSを用いて録音された。ヘッドホンを着用した被験者に対し，まず環境音を提示し，10秒ほどしたら接近報知音を重ねて提示した。環境音の提示レベルはそれぞれ録音時と等しくなるよう設定されている。接近報知音はMatlabによって作成したプログラムによって制御され，被験者の手元の画面上に表示されるスライダで音量を自由に調整できる。調整された音量は吹鳴区間の実効値で測定した。被験者はFigure 1のような位置にある車両から発せられたと仮定した接近報知音刺激について，「最適聴取レベル」（考え事をしていたり，人と話していたりしていても車の存在に気づくためにちょうどいい音量）と「検知レベル」（与えられた環境で最低限聞こえる音量）の2種類の基準での音量調整を行った。それぞれの刺激対について2回ずつの評価を得た。

各被験者の同一刺激組に対する2回の調整音量の差を観察すると，最適聴取レベルの評価では多くが10dB以内であった。環境音刺激はその騒音レベルが変動するため音量調整は容易なタスクではないことを考えると，2回の試行の差は妥当なものであると考えられる。また，現実の環境下で歩行者が聴取する状況では，この程度の評価の差が存在するものと考えべきである。検知レベルは，いずれの刺激対でも10dB以内であり，5dB以内にあるものも多い。

Figure 2に，各刺激条件での最適聴取レベルおよび検知レベルの中央値と四分位範囲を示す。最適聴取レベルは環境騒音レベル $\pm 10$ dB程度に分布している。接近報知音別に見る

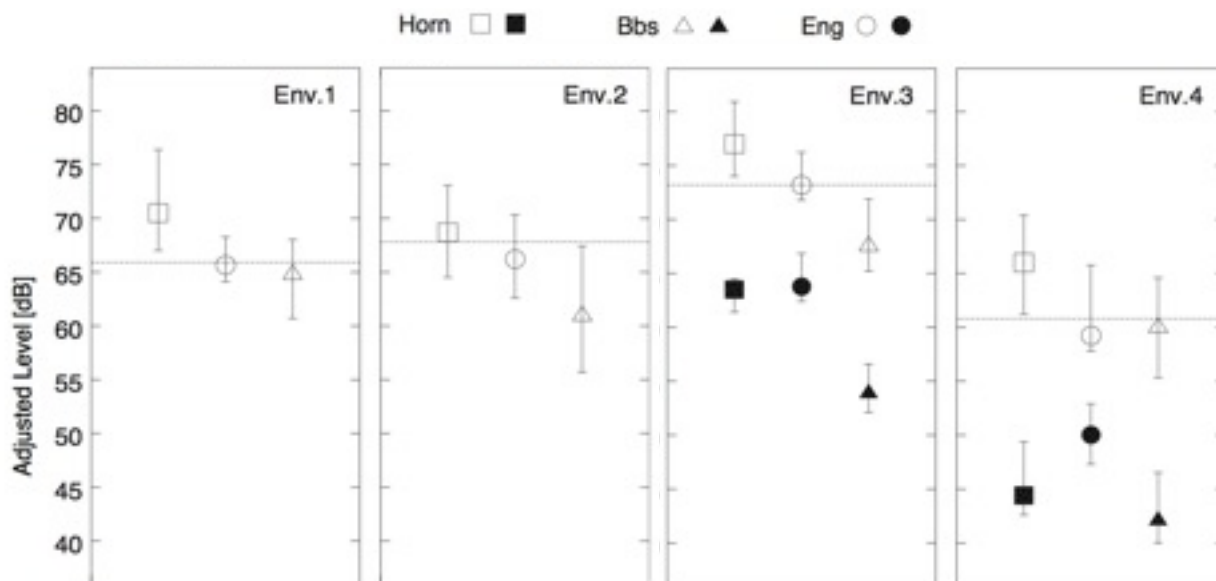


Figure. 2 – Medians and interquartile ranges of the adequate levels (open markers) and the lowest levels (filled markers). The horizontal dashed line indicates the environmental noise level (LAeq) for each background condition.

と、クラクションが比較的大きく、広帯域音が比較的小さいレベルに調整されている。被験者内での調整音量変動が10dB程度であるので、その差は十分に大きいとは言い難いが、より小さな音量で車の存在に気づかせられる接近報知音を設計できる可能性が示唆される。ただし、本実験で得たのは気付くために十分な音量の評価であり、音質の快適性（もしくは、うるささ）に関して別途検討する必要があることを指摘しておく。

検知レベルと環境騒音レベルの差は接近報知音によって異なる。エンジン音およびクラクションは10～15dB程度であり、最適聴取レベルと検知レベルの差が10～15dB程度の接近報知音は、ある環境で最適な音量はそこより10～15dB程度うるさい環境下で検知できない可能性がある。一方、広帯域音は、検知レベルと環境騒音レベルの差が20dB程度と大きく、よりうるさい環境下でも検知されやすい傾向にある。つまり、スペクトルが広帯域に分布する音はより小さな音量でも検知される可能性があり、より聴き取りやすい接近報知音を設計できる可能性が示唆される。

また、結果を日本のガイドラインを対応させると、ガイドラインで示される「間近で55dB程度」という音量では、音の種類によっては、環境騒音レベル50～60dB程度の環境では最適であるが、65～70dB程度以上の環境では検知されない可能性が指摘される。

Electric and hybrid electric vehicles (EV/HEV) have the advantages of being more environmentally friendly and quieter than internal combustion engine vehicles. However, reduced noise can also lead to potentially dangerous situations for pedestrians when an oncoming vehicle is inaudible in a given background noise. Installation of warning sounds which are radiated by the vehicle to alert pedestrians is being considered in various countries. Since this is a global topic, it is



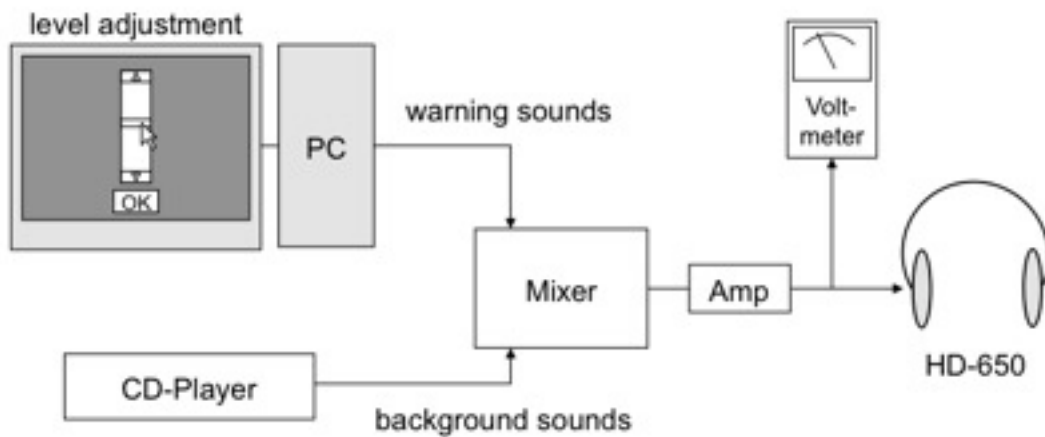


Figure 3 – Experimental set-up

of vital interest whether there exist cross-cultural differences.

Four environmental background sounds were recorded: a two-lane busy street in down town, a two-lane road in a residential area, six-lane heavy traffic and a narrow road in a shopping area. The recordings were performed binaurally using a head and torso simulator (HATS) located on the sidewalk. Three potential warning sounds were used in this study: a car horn (sampled from a commercial CD), the sound of an idling gasoline engine (recorded at a distance of 2m to the vehicle), and bursts of band filtered white noise. These sounds were played back over a loudspeaker in an anechoic room and re-recorded binaurally via the HATS to simulate a position 2m diagonally behind the subject (Figure 1). The experiments were performed in a darkened sound-proof booth. The signals were presented dichotically over Sennheiser HD-650 headphones. The input voltage to the headphones was measured, so that, knowing the headphone sensitivity, the playback level could be calibrated (Figure 4).

Subjects could adjust the level of the warning sounds using a slider visible on a computer screen. In one part of the experiments, subjects were asked to adjust the level of the warning sounds so that they are clearly audible and can be reliably detected in the background noise. In the second part the goal was to adjust the level so that the warning sounds are just audible. The order of these tasks was switched for each new subject. All stimulus combinations were presented once in pseudo-random order. All subjects took part in a second trial some weeks later to check for intra-individual differences. Eleven male and four female German subjects aged 26 to 49 (mean 31.3) participated in the experiments. All reported normal hearing.

Figure 2 shows the inter-individual medians and interquartile ranges of the adjusted levels for all stimulus combinations. White symbols indicate warning signals which were adjusted to be clearly audible, black symbols show warning signals which were just audible. Additionally, the RMS levels of the background sounds are marked by horizontal lines. As expected, the adjusted levels of the warning signals depend strongly on the level of the background sounds. Differences between adjusted levels for each background sound correspond to the respective differences between the environmental sound levels. It can also be seen that the type of warning sound plays an important role. In each case, a car horn needed more level to be (clearly) audible than the other

sounds, while band limited noise was detectable more easily. The levels of clearly audible warning signals are about 15 to 20dB higher than their respective audibility thresholds. Inter-individual interquartile ranges can reach almost 10dB. This rather large variability is likely caused by the strong level fluctuations of the environmental background sounds (e.g. varying amount of cars passing by on the road). These fluctuations are probably also the reason for large intra-individual differences between the two trials (Fig. 3). Subjects frequently adjusted the same sound in the second trial to a level 10dB or more different from the first trial.

The results shown in Figure 2 indicate a strong influence of the type of warning sound as well as the background sound on the necessary level of the potential warning signal. A sound with an adequate level which is clearly audible in one environment (e.g. car horn in a shopping area), may be at the detectability threshold in another background (e.g. car horn in heavy traffic). Regarding guidelines for sound levels of warning signals radiated by vehicles, it can be seen that recommending one fixed level could be problematic. For example, the Japanese guideline recommends a value of 55dB (reference of Japanese guideline [3]). Such a sound might be adequate in one particular environment, but might become inaudible and therefore ineffective in the presence of higher background levels. An adaptive strategy to adjust the radiated level to the current background sound might provide a more effective solution.

### 3. 今後の展望と感想

今後、日本国内を含む、他地域在住者を対象とした検討や、音質に対する評価等を実施して行く予定である。ミュンヘン工科大学とは今後も共同プロジェクトを継続することを約束しており、日独の比較を中心として、国際的なプロジェクトと育てていきたい。

ただ、実際に滞在を終えて、5ヶ月という期間では実施できる研究についての時間的制約が大きく、十分な期間ではないという印象であった。しかし、このような滞在によって、（もちろん、より長い期間の滞在が望まれるが）、研究のみならず、滞在先の教育事情や環境について知り、本学教育への還元できる知見も深められた。貴重な機会に対して、深く感謝申し上げる。

