

異なる残響下におけるピアニストのペダリングの変化

清水風太^{†1} 饗庭絵里子^{†1,2}

概要: ピアノのサステインペダルは、その操作によって弦振動の持続や停止を制御することができる。そしてプロピアニストは、演奏空間の残響に応じて、これを細かに調整しているとされているが、実際にどのような制御を行っているのかについて調査した研究は非常に少ない。そこで本実験では、演奏をしているピアニストのペダリング計測を、レーザ測位計を用いて高精度で行った。この際、試行ごとに異なる残響をフィードバックすることで、演奏者のペダリングが演奏空間にどのように適応しているのかを観察した。この実験の結果から、残響が長く続く状態では、ピアニストが一回に踏むペダルの長さが減少することや、ペダルをより浅く踏み込むことが明らかとなった。今後の展望としては、本実験で得られた結果を用いることで、演奏空間の残響量を加味したピアノ演奏の自動生成を目指す。

キーワード: サステインペダル, ハーフペダル, ホール音響, フィードバック制御, 自動演奏,

Pianists' Sustain-pedal Control under Different Reverberation Time Conditions

FUUTA SHIMIZU^{†1} ERIKO AIBA^{†1,2}

Keywords: Sustain pedal, Half pedal, Concert hall acoustics, Feedback control, Automatic performance

1. はじめに

ピアノの演奏において、サステインペダルの操作は重要な演奏技術要素のひとつである。サステインペダルは、ダンパーペダルとも呼ばれ、3本あるペダルのうち一番右のものをさす (Fig. 1 における①)。サステインペダルが踏まれている場合、鍵盤を押すと押された鍵盤に対応するハンマ (Fig. 2 における③) が上昇し打弦 (Fig. 2 における④) される。その際、弦を押さえているダンパ (Fig. 2 における⑤) も同時に上昇するが、指を鍵盤から離すとダンパも一緒に下降し、弦振動が停止させられる。一方、サステインペダルが踏まれている間は、弦を抑えていた全てのダンパが持ち上がるため、鍵盤から指を離したとしても弦振動が持続する (以下、本論文では今後、サステインペダルを単にペダルと表記する)。

プロピアニストは、この機構を活用し、ペダルを細かに制御することで様々な演奏表現や、演奏空間に合わせた残響時間の調整を行っている。具体的には、音と音を滑らかにつなげたり、離鍵後も弦を振動させ続けたりすることによって、より多くの弦の振動を維持し、ハーモニー豊かな演奏を実現している。ペダルは、押された鍵盤に対応するダンパだけではなく、全ての鍵盤に対応するダンパを上昇させるため、単音のみを打鍵した場合であっても同時に他の弦が共振し、響きに変化を与えることもできる。さらに、

ハーフペダルと呼ばれる演奏技術では、ペダルの上げ下げを素早く行い、主に中音域以上の音を減衰させる目的で行うペダリングや、ダンパを完全には上げずにわずかに弦に触れさせ続けることで、完全にペダルを踏んだ状態よりは短い響く音を残す目的で行われるペダリングがある。

もう一点、ペダリングにおける必要な要素として、演奏空間の残響時間に応じたフィードバック制御があげられる。残響時間が短い空間ではペダルを長めに踏むことで、楽器そのもので長い響きをつくることができる。一方、残響時間が長い空間ではペダルを長く踏んでしまうと響きが濁ってしまうため、空間そのものの残響を利用して音の響きを調整し、ペダル操作は控えめにする必要がある。

プロピアニストは、自身の理想とする演奏表現や音の響きを実現するため、ペダルを上げ下げするタイミングやその深さを繊細に制御している。本研究においては、このようなペダル操作が演奏空間の残響時間によってどのように制御されるのかを実験的に調査する。

これまでのペダルに関する先行研究には、ペダルの効果や、ピアニストのペダル制御、本研究のように演奏空間の残響時間によるペダリングの変化を観察したものがある。

Lehtonen (2007) らは、物理的な側面としてペダルによる効果の解析と、それをういたモデリングに関する研究を行っており、作成したアルゴリズムの聴取実験において、高音域と低音域では実際のペダルと区別がつかない程度の効

^{†1} 電気通信大学
University of Electro-Communications

^{†2} 電気通信大学技能情報学研究ステーション
Center for Art and Performance Science, University of Electro-Communications

果を再現すること成功している[1].

また、ピアニストのペダル制御に関して、Repp(1994 & 1997)は演奏中のペダリングがテンポの違いから受ける影響に関して調査を行った[2, 3]. この時 Repp は2つ仮説を立てており、1つは IOI (MIDI のノートがオンセットになってから、次のオンセットまでの期間) におけるペダリングの間隔が一定でテンポに依存する、というものである。2つ目は、前者とは逆に IOI に比例してペダリングの間隔が伸縮し、IOI とペダリングが一定の関係を維持するというものである。この仮説のもとで、全2曲を異なる3つのテンポで3回ずつ演奏する実験を行った。しかし、実験結果から各コード間でのペダルの関係性を調査したが、仮説のような結果は得られなかった。

加えて、Bolzinger (1992 & 1994)や村田 (2011) は、残響可変装置を用いて残響時間を変化させ、ピアノ演奏にどのような変化が生じるかを観察している[4, 5]. その結果、残響時間の変化でフルペダルの時間比が変化することなどが明らかになった。

本研究においては、これらの先行研究では扱われていない時系列的なデータ解析や、ハーフペダルに着目した解析を行うことで、プロピアニストの繊細なペダル制御を観察する。また、先行研究のデータ解析には Musical Instrument Digital Interface (MIDI) 信号が利用されている。MIDI 信号は、128 段階 (0~127) でペダルの踏み具合を表現することができるが、本研究においてはより詳細な時系列データの取得および、将来的に生ピアノでの計測にも対応するため、レーザ変位計を用いて計測を行う。その上で、プロピアニストが演奏空間の残響時間によってペダリングをどのように変化させているのかを調査した。

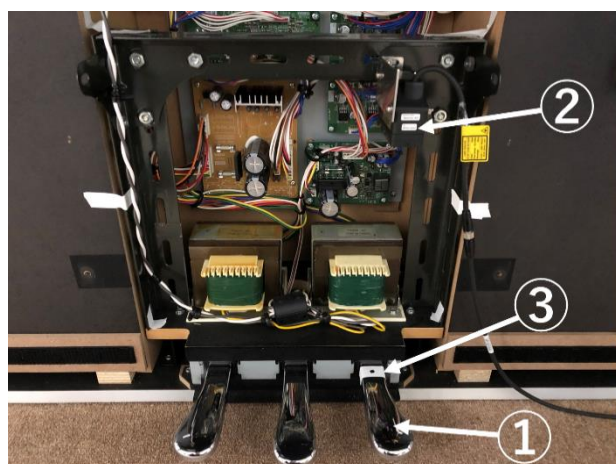


Fig. 1 Razer positioning meter attached to the sustain pedal

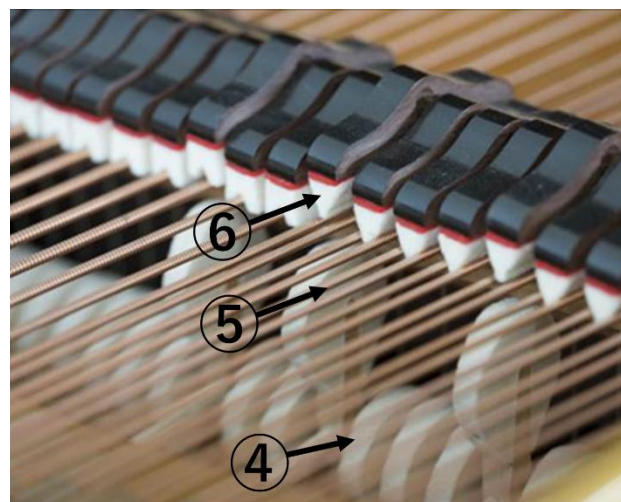


Fig. 2 Hammers, strings, and dampers inside the grand piano

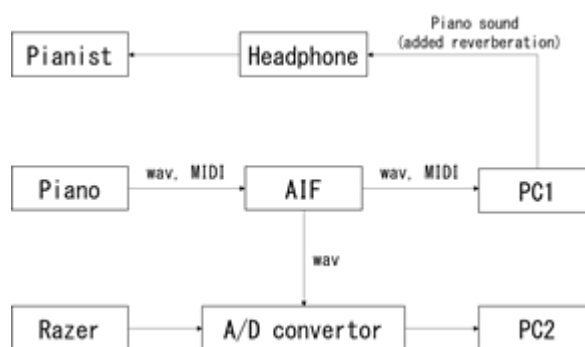


Fig.3 Experimental equipment

2. 実験

2.1 実験参加者

実験参加者は、プロピアニスト 5 名 (すべて女性) および、アマチュアピアニスト 3 名 (内、男性 2 名) である。

また、実験参加者の年齢平均は 31 歳、標準偏差は 7.4 歳である。経験年数の平均は 25 年、標準偏差は 4 である。

2.2 実験環境

本実験に用いたシステムは Fig. 1 のとおりである。演奏用のピアノとして電子ピアノ (AvantGrand N2, YAMAHA) を用いた。演奏データを記録するため、このオーディオと MIDI の出力をオーディオインタフェース (OCTA-CPTURE, Roland) (Fig.3 における AIF) に入力し、この入力された信号を、ノートパソコン 1 (ThinkPad, lenovo) (以下 PC1) に入力した。入力されたオーディオと MIDI の信号を、PC1 にインストールされた DAW ソフトウェア (Cubase Pro 9.5, Steinberg) で記録した。また、このソフトを用いて演奏音に様々な残響を付与し、再びオーディオインタフェースを通して被験者のヘッドホン (HD 650, SENNHEISER) へと

フィードバックを行った。さらに、オーディオインタフェースを A/D 変換装置 (USB 対応アナログ入出力ユニット, 株式会社コンテック) に接続し, 入力されたオーディオ信号をデジタル信号へと変換した。変換した信号を A/D 変換装置に接続したノートパソコン 2 (ThinkPad, lenovo) (以下 PC2) に入力し, これにインストールされたソフト (C-LOGGER, 株式会社コンテック) で記録した。これとは別に, ペダリングの観測を行うための装置としてレーザ測位計 (IL-300, KEYENCE) を Fig. 1 の②ように電子ピアノに取り付けた。この時, レーザ光は Fig. 1 のペダルに張り付けられたテープの黒点に当たるようになっている。この装置によって測定された距離を先述の A/D 変換装置に接続し, 先述のオーディオ信号と同様に PC1 に入力し, C-LOGGER を用いてオーディオ信号とともに記録した。

2.3 実験方法

質問紙調査

実験を行う際に実験参加者らに質問紙調査を行った。実験を始める前に行った質問の内容は, 被験者の経歴やピアノ歴などのプロフィールに関するものである。実験中にも調査を行い, 試行ごとの残響の長さや好み, 演奏時に留意した点などのコメントなどを記録した。実験後には, 今までに課題曲を練習したことがあるか, ある場合はどのような時に練習を行っていたのかを調査した。

演奏実験

実験参加者らは, 防音室内に置かれているピアノで課題曲 (シューマン, 「子供の情景」より 第 7 曲 トロイメライ) の最初の 16 小節を繰り返しなして演奏した。Repp (1997 & 1994) による実験においても, この作品が課題曲として使われている [2, 3]。演奏中, 実験参加者への演奏音のフィードバックはヘッドホンを通して行われ, 演奏音には 3 種類の演奏空間を想定した残響が付与された。残響の長さは約 250 ms, 500 ms, 750 ms の 3 つである。250 ms は防音室, 500 ms は演奏ホールでの, 750 ms は大聖堂を想定した残響である。1 つの残響条件につき 3 回繰り返して演奏を行ってもらい WAV 形式 (48 kHz) および MIDI 形式で記録した。またレーザ変位計によって計測されたペダル位置は, CSV 形式 (40 kHz) によって記録し, 時刻合わせのために演奏音も合わせて記録した。

次に, 実験の手順を記す。実験参加者には初めに, 実験に用いるピアノや設定された残響に慣れてもらうため, 数分間の練習を行ってもらった。その後, 1 種類の残響に対して 3 回ずつ続けて演奏を行ってもらった。この時の残響条件は, 順序効果を考慮に入れて被験者毎にランダムに設定した。1 条件の演奏が終わったところで, 先述の実験中に行った質問紙調査を行い, その条件に対して実験参加者が主観的に感じた残響の長さ, 自宅で行う練習と比較したときの残響の長さ, 残響の好みを 7 段階での評価を依頼した。また, 最後にその実験条件下で演奏する際に留意した

点に関する自由記述欄を設けた。

ここまでの 3 条件分繰り返し行った。また, 実験参加者は 1 試行内でなければ任意のタイミングで休憩をとることが出来るようにした。

また, ピアニストごとにハーフペダルの位置などが異なる可能性があることから, 各条件の最後にペダルがかかり始めると感じる位置まで踏み込んだ状態で約 10 秒間, ペダルを最下点まで踏み込んだ状態で約 10 秒間, ペダルを離した状態で約 10 秒間計測し, キャリブレーション値として扱うこととした。

3. 解析

実験で得られた音信号とペダル信号は, 試行によってテンポなどが異なる。そこで, FFT を用いて音波形をスペクトログラムに変換し, それに DTW (動的時間伸縮法) を適用することで調整を行った [7]。

4. 結果

実験から得られた結果として, ある実験参加者の解析結果を Fig. 4 に示す。これらの図において, 横軸は時間 (秒) を表し, Pedal On はペダルを完全に踏み込んでいる状態, Pedal Off はペダルから足を離している状態, Half Pedal は実験参加者がペダルのかかり始めを主観的に感じたものとなっている。また, Pedal On, Pedal Off の値が残響条件ごとにわずかに異なっているのは, レーザ測位計の測定時のブレによるものである。

これらのグラフから, 残響時間が変化するとペダルを踏む深さに変化があることが分かった。特に, 残響時間が 750 ms の際は Pedal On にまで達するペダリングは観測できていない。さらに, 0~5 秒程度の範囲に注目すると, 残響時間が 250 ms, 500 ms の際にはペダルを踏んでいることが見て取れるが, 残響時間が 750 ms では確認できない。また, 各条件における Half Pedal からの位置から, ペダルがかかり始めたと感じる位置が, 残響が長くなるとともにより深く踏んだ位置に移動していることが分かった。これは, 残響による響きにペダルの効果が隠れてしまっているためであると考えられる。

次に, 1 試行内において各深さのペダルを踏んでいる長さの比較を行うために, Fig. 5 のヒストグラムを示す。これらの図から, 残響時間が長くなるにつれて Pedal On の付近に信号が多くなる傾向にあることが分かる。これと同時に, Pedal Off 付近に存在していた信号は少なくなった。このことから, 1 試行あたりにおけるペダルを踏んでいる時間が長くなっていることが分かった。また, 残響時間が 250 ms や 500 ms の場合は, Half Pedal の付近に高めのピークが出現しており, ハーフペダルなどの操作を用いて細かな調整を行おうとしていたことが考えられる。

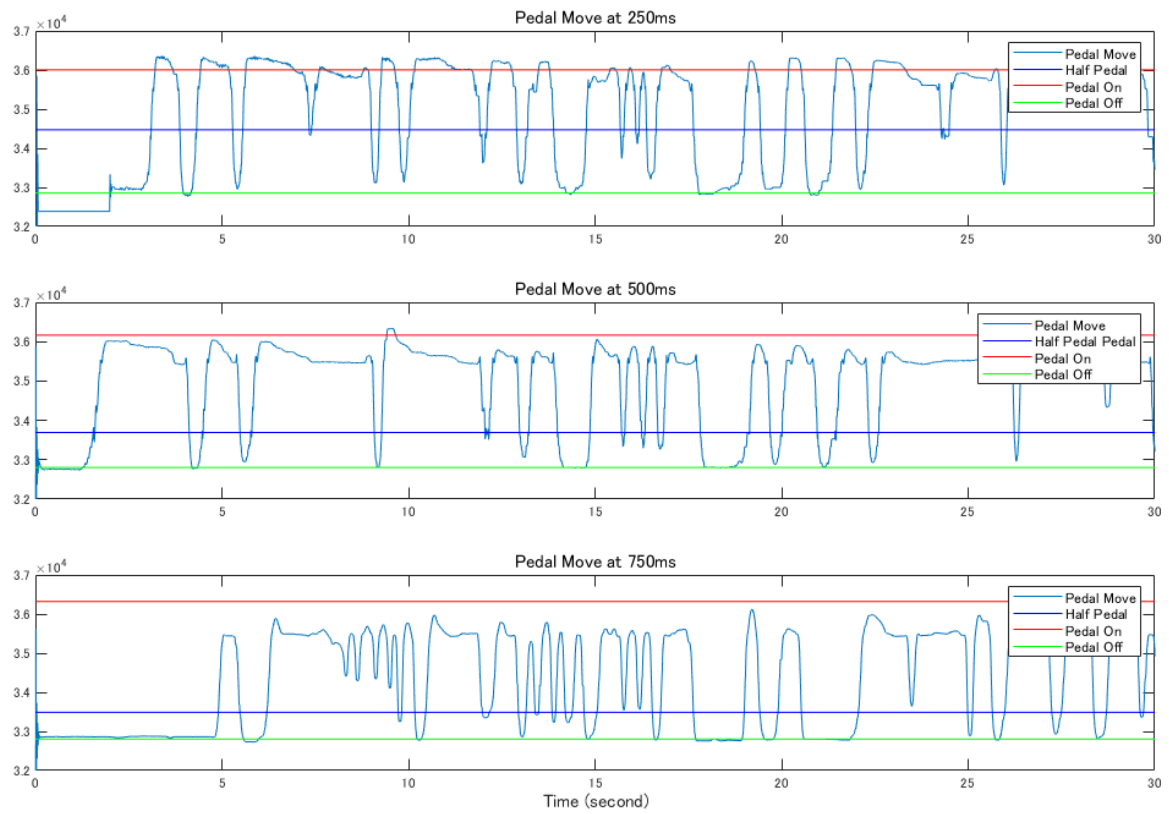


Fig. 4 Pedal movement comparison

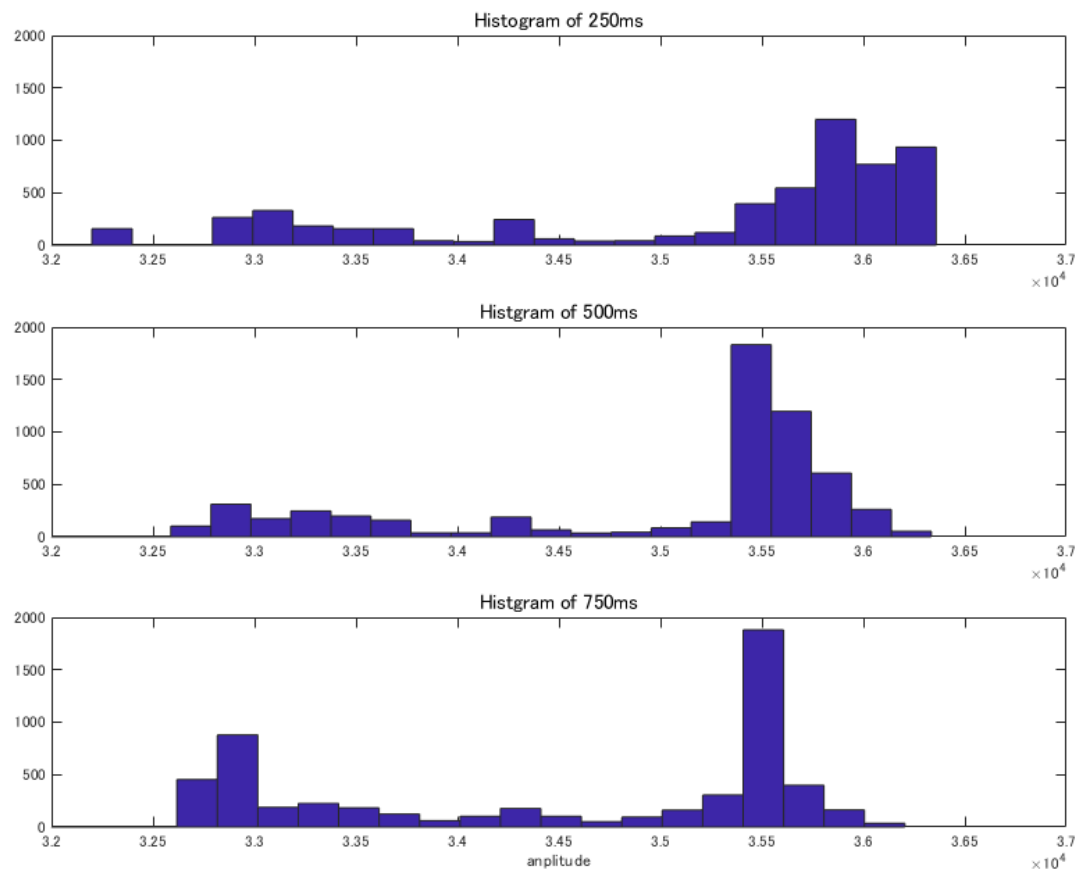


Fig. 7 Comparison of histogram

実験中に行った質問紙調査を集計した結果、実験参加者の響きに対する好みの点数は残響時間が約 500 ms のときに高くなる傾向が見られた。自由記述欄においても、500 ms の条件では弾きやすいと回答した実験参加者が多かった。逆に、好みが最も低い点数となった条件は残響が約 750 ms の時であり、自由記述欄では、ペダルを踏まなくても勝手に響いてしまう、自らで響きを調整できない、などが挙げられた。

5. 考察

各残響時間に応じて、ペダルを踏む深さやタイミングが異なっていたことから、ピアニストは残響時間に応じてペダリングを変化させていたといえる。

ペダルの深さについてもタイミングについても、残響が最も長い 750 ms の時に他の残響時間との違いが顕著に示されていた。質問紙調査にもある通り、残響時間が長い場合には、自分でペダルを用いた響きの調整を行えないことから、ペダルを踏むのではなく、他の要素の操作（テンポや音圧など）を用いて、響きを調整していたと考えられる。好みの評価も 750 ms が最も低く、ピアニストが意図したとおりに弾きづらかった可能性が考えられる。

各ペダルの深さを踏んでいた長さは、残響時間が長くなるにつれ、浅く踏んでいる時間が長くなることが明らかになった。500 ms および 750 ms については、Pedal On より少し手前にヒストグラムのピークがあるが、250 ms についてはさらに上の値にピークがある。いずれのピーク付近においても、既にペダルがかかる量には差がない深さに達しているが、自らの演奏の響き具合から自然と変化が生じていることが予想される。

加えて、残響時間が 250 ms や 500 ms の場合は、Half Pedal の付近に高めのバーが出現しており、ハーフペダルなどの操作を行っていたことが考えられるが、750 ms ではほとんどピークが見られない。この結果も、残響時間が長い場合には、細かなペダル操作は響きの制御に有効ではないとされ、他の方法で響きを調整しようとしていた可能性が考えられる。

6. 結論

プロピアニストが演奏空間における残響時間によってペダルの制御を変化させていることが分かった。今後は、ペダル制御と音響特性の時系列変化の関係の調査を行う予定である。また、MIDI データに依存しない解析が実施できたことから、生ピアノを用いた実験にも展開していきたいと考えている。

謝辞 本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム」および物質・デバイス領域共同研

究拠点 2018 年度展開共同研究 A の支援によって行われた。

参考文献

- [1] Heidi-Maria Lehtonen et al. Analysis and modeling of piano sustain-pedal effects. Acoustical Society of America. 2007. DOI: 10.1121/1.275172. p. 1787-1797
- [2] Bruno H. Repp. The effect of tempo on pedal timing in piano performance. Psychological Research. 1997. pp. 162-172.
- [3] Bruno H. Repp. Pedal Timing and Tempo in Expressive Piano Performance: A Preliminary Investigation. Haskin Laboratories Status Report on Speech Research. 1994. Pp. 211-232.
- [4] S. Bolzinger and J. C. Risset: A Preliminary Study on the Influence of Room Acoustics on Piano Performance, Journal de Physique III. Volume 2, C1-91 –C1-96, 1992.
- [5] Bolzinger, S., Warusfel, O. & Kahle, E. A study of the influence of room acoustics on piano performance. (1994). doi:10.1051/jp4:19945132
- [6] 村田義明, 佐久間哲也, 上野佳奈子, 川井敬二, 加藤浩介: 残響条件がピアノ演奏に与える影響に関する実験的検討—MIDI 信号を用いた演奏情報の分析—, 日本音響学会研究発表会便覧論文集（春季）, 2011
- [7] Sakoe, H. & Chiba, S. Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition.