

機関番号：14501  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20500205  
 研究課題名(和文) 特徴空間を知識移転するマルチタスク・パターン認識モデルの開発と個人認証への応用  
 研究課題名(英文) Development of Multitask Pattern Recognition Model with Knowledge Transfer of Feature Space and Application to Person Identification  
 研究代表者  
 小澤 誠一(OZAWA SEIICHI)  
 神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：70214129

研究成果の概要(和文)：互いに関連性をもつ複数のパターン認識タスクを逐次的に学習する環境において、特定タスクの知識を別のタスクに「知識移転」することで、少ない訓練データで効率よく学習できることが知られている。本研究では、パターン認識の問題において、有効な特徴量を抽出する特徴空間を知識として、その知識の一部を未知の認識タスクに移転して、追加学習する方式を開発した。また、学習方式を顔画像に基づく個人認証システムに実装し、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In the environments where multiple pattern recognition tasks with some relatedness are learned sequentially, it is known that the learning is conducted efficiently even with a small number of training data by using “knowledge transfer” from one task to another. In the research project, we developed a multitask learning algorithm with an efficient knowledge transfer mechanism where a useful feature space is learned incrementally in an efficient way by transferring a part of previous learned knowledge to an unknown task. The proposed multitask learning algorithm is implemented as a person identification system using face images and the effectiveness of this system is verified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：知能情報学

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ニューラルネット, マルチタスク学習, 機械学習, パターン認識, 特徴抽出

### 1. 研究開始当初の背景

機械学習におけるこれまでの多くの研究では、学習アルゴリズムが担う学習タスクを1つに限定し、タスクが時間的に変動しないという仮定をおいてきた。しかし、人間のみならずあらゆる生物は、様々なタスクを逐次的に学習しながら知識を獲得・蓄積し、新しいタスクに対しても迅速に(少ない経験で)

適応できる。この学習過程を模倣する機械学習の枠組みには、マルチタスク学習や Life-Long Learning などがあり、ロボットの学習や医療診断など、様々な応用が試みられている。このような能力を機械がもつには、経験事例が増えるたびに性能を改善できる「オンライン学習」や「追加学習」の能力、さらに過去に獲得した知識を新しいタスク

の学習に役立てる「知識移転」の能力をもつ必要がある。特に、後者は少ない経験事例で新しいタスクを迅速かつ汎化性の高い学習を可能にし、応用面での重要性が指摘されている。

マルチタスク学習は、国際シンポジウム NIPS1995 のワークショップ "Learning to Learn" で提唱された。R. Caruana は主タスクと複数の副タスクを一つの 3 層ニューラル ネットで学習し、サブタスクの共有知識が隠れ層の内部表現として形成されるモデルを提案した。単純な構造ではあるが、内部表現を帰納バイアスとして自然な形で主タスクの学習に組み込むことができ、少ない訓練サンプルで高い汎化能力が得られる。また、D. Silver は Domain Knowledge と呼ばれる一種の長期記憶を導入し、タスクが逐次的に与えられる逐次マルチタスク学習の問題に Caruana のモデルを拡張した。これら 2 つの取り組みで共通しているのは、各タスクの訓練サンプルが一括して与えられるバッチ学習を想定していることと、訓練サンプルがどのタスクに属するかを明示的に与えていることである。これらの仮定は、より現実的な Life-Long Learning 環境を想定すれば、必ずしも自然な仮定とはいえない。NIPS1995 から 10 年経った 2005 年に "Inductive Transfer: 10 Years Later" というワークショップが NIPS2005 で開催されたが、ここでも、上記仮定を緩和する試みは行われていない。

## 2. 研究の目的

逐次的に与えられる複数のタスクから知識を獲得する学習は「逐次マルチタスク学習」と呼ばれる。この学習では、過去に獲得したタスクの知識を新しいタスクに利用する「知識移転」の機能が実現され、少数の学習サンプルでも高い汎化能力が得られることが求められる。平成 18-19 年度の科研基盤 (C) では、タスクだけでなく訓練サンプルも逐次的に与えられ、明示的にタスクの情報を与えられない状況でもタスク変動の検知と知識移転を行える学習モデルを開発した。このモデルでは、新しい認識タスクが検知されるたびにニューラル識別器が生成され、直前タスクのクラス領域の情報知識が知識移転される。この研究によって、識別器間で知識移転が可能となったが、パターン認識の重要な処理過程である特徴抽出には、タスク間の知識移転が考慮されていない。そこで本研究では、過去の認識タスクで求められた特徴空間モデルのうち新しいタスクに最適なものを選択し、それを「帰納バイアス」として初期特徴空間として利用する方法を検討する。また、特徴空間と識別器に対して最適な知識移転が行われる条件を明らかにし、効率のよい知識移転アルゴリズムを開発する。さらに提案

モデルの実用性について検証するため、画像や音声を入力とする複数の認識タスクで構成される新しいタイプの個人認証システムへの応用を試みる。

## 3. 研究の方法

逐次マルチタスク学習環境下において、識別器だけでなく特徴抽出部の知識を新しい認識タスクに移転できるマルチタスク・パターン認識モデルを開発することを目指し、以下の項目について研究を進めた。

### (1) 特徴空間の追加学習アルゴリズムの開発

訓練データが逐次的に与えられる環境において、すぐれた特徴をオンラインで抽出するための追加学習アルゴリズムを開発する。具体的には、主成分分析やカーネル主成分分析、線形判別分析が追加学習可能となるよう拡張し、高速かつ近似精度の高いオンライン特徴抽出アルゴリズムを開発する。

### (2) 識別器の追加学習アルゴリズムの開発

訓練データが逐次的に与えられる環境において、識別器を安定に追加学習するための学習アルゴリズムを開発する。具体的には、基底関数ネットワークを拡張した Resource Allocating Network with Long-term Memory (RAN-LTM) モデルを用い、この高速学習アルゴリズムおよび自律学習モデルを開発する。

### (3) 逐次マルチタスク学習モデルの開発

異なるが類似した認識タスクが逐次的に与えられるとき、タスクの情報を与えられなくても、タスク変動を自動的に検知し、既知タスクと未知タスクを識別した上で、教師なしでクラスラベルを適切なタスクに分類し、かつ、既知タスクから未知タスクへの知識移転によって、少ない訓練データで高い汎化能力をもつニューラルネットワークモデルを開発する。

### (4) 特徴空間を知識移転するマルチタスク・パターン認識モデルの開発

逐次マルチタスク学習の環境において、異なるタスク間で共通して有効な特徴を特定し、それを利用することで、識別特性の高い特徴空間をオンラインで構築するための学習アルゴリズムを開発する。

### (5) 顔画像認識に基づく個人認証システムへの実装

上記のオンライン特徴抽出アルゴリズムと逐次マルチタスク学習モデルを顔画像認識に応用し、個人認証システムとして実装する。さらに認識率を評価することで、特徴空間の知識移転の有効性を検証する。

#### 4. 研究成果

特徴空間を知識移転するマルチタスク・パターン認識モデルの開発を進め、以下の成果を得た。

##### (1) 特徴空間の追加学習アルゴリズムの開発

###### ① 追加学習型主成分分析の開発

複数のデータが同時に与えられたとき、それらに対して、一回の計算で固有軸の更新を行える新しい追加学習型主成分分析アルゴリズムを開発した。また、固有軸の追加条件の基準となる累積寄与率の閾値を自動決定する方法を提案し、学習アルゴリズムに組み込んだ。機械学習で通常用いられるベンチマークデータを用いて、固有空間モデルの近似誤差や識別率などを評価した。その結果、提案アルゴリズムによって、固有空間モデルの近似誤差を最小限に抑えながら、高速に固有軸の更新を行えることを確認した。また、累積寄与率の閾値を動的に決定することで、認識率のデータ依存性を軽減し、高い認識率が安定して得られることを示した。

###### ② 追加学習型カーネル主成分分析の開発

訓練データの中から特徴空間(または標本特徴空間)において一次独立となるものを選択し、固有軸がそれらの線形和で表わされることを利用して、オンラインで固有空間モデルを更新できる追加学習型カーネル主成分分析アルゴリズムを開発した。また、特徴空間での固有軸の精度を高めるため、一次独立データが固有軸数より多くなることを許容し、高速に追加学習可能なアルゴリズムを開発した。機械学習で通常用いられるベンチマークデータを用いて、固有空間モデルの近似誤差や識別率などを評価した。その結果、提案アルゴリズムによって、固有空間モデルの近似誤差を最小限に抑えながら、高速に固有軸の更新を行えることを確認した。

###### ③ 追加学習型再帰フィッシャー判別の開発

線形判別分析(LDA)で求められる判別空間の次元は、クラス間変動行列のランクにより、クラス数より小さくなる。これに対し、判別空間の補空間からクラス分離度の高い判別軸をオンラインで求める追加学習型再帰フィッシャー判別を開発した。機械学習で通常用いられるベンチマークデータを用いて、LDAと比較を行った結果、データの種類の依存せず、常に高い認識率が得られることを確認した。

##### (2) 識別器の追加学習アルゴリズムの開発

###### ① 追加学習の高速化

ニューラルネットでは、過去に獲得された知識が結合荷重に分散して記憶されるため、新たに入力された訓練データの学習によっ

て、過去の知識に影響を与えやすい。この現象は追加学習にともなう「干渉」と呼ばれ、以前から「可塑性と安定性のジレンマ」として知られてきた問題である。干渉を効率よく抑制し、安定な追加学習を行うアプローチとして、ラジアル基底関数(以下、RBF)の活性化度に基づいて出力への貢献度を定量化し、修正する結合荷重を限定するメカニズムを導入した新しい追加学習方式を開発した。提案方式の学習高速性と省メモリ性を確認するため、1次元関数近似問題とノイズを含む多次元関数近似問題に適用して、性能評価を行った。その結果、テスト誤差、学習時間、平均メモリ量の点で有効性を確認した。特に多次元データに対しては、強力な追加学習アルゴリズムと言われているLWRと比べて、ほぼ同等の近似精度を維持した上で、必要メモリ量が少なくて済むことを確認した。

###### ② 自律追加学習アルゴリズムの開発

ラジアル基底関数(RBF)ネットワークを用いて、高性能な識別器を実現するには、一般にいくつかのパラメータを適切に決める必要がある。しかし、追加学習の環境では、十分な訓練データが事前に与えられるとは限らず、この場合、パラメータを適切に決めることは容易でない。そこで、必要十分な訓練データを収集し、パラメータを自律的に決定できるメカニズムを有した学習アルゴリズムが望まれ、これを自律学習という。本研究では、自律学習機能として、パラメータの自動決定だけでなく、訓練データの前処理の選択を行うRBFネットワークの開発を行った。機械学習で通常用いられるベンチマークデータを用いて、自動決定されるパラメータ値の適切さや前処理の選択精度を認識率に基づいて調べたところ、データによっては、多くの訓練データを収集する必要があるものの、安定して高い認識性能が得られることを確認した。

##### (3) 逐次マルチタスク学習モデルの開発

###### ① モジュール型ラジアル基底関数ネットワークの開発

識別器の追加学習、タスク変動の検知、既知・未知タスクの識別、タスク分類、知識転送の機能を有する逐次マルチタスク・パターン認識モデルを開発した。このモデルでは、タスク変動を検知すると既知・未知タスクの識別が行われ、既知タスクであれば長期記憶から対応する識別器を想起して追加学習を行う。一方、未知タスクと識別すると新しい識別器を生成し、現タスクの識別器から知識移転を行う。知識移転の効果を調べるため、機械学習のベンチマークデータをマルチタスク学習用に変更し、未知タスクに対する認識率の向上率を調べた。その結果、知識移転

機能を導入することにより、高速に提案モデルの汎化能力が向上し、少ない訓練データで高い汎化能力をもつことを示した。

## ②単一ラジアル基底関数ネットモデルの開発

タスクごとに識別器を構成すると、学習するタスク数が多いとメモリ効率の意味で非効率である。この問題を改良するため、単一識別器で逐次的に複数タスクを学習できるモデルを開発した。さらに、過去に学習したタスクのうち、最も類似度の高いタスクを特定し、その知識を選択的に転送する機能を付加した。その結果、単一識別器であっても、安定した学習が可能であり、選択的知識移転を導入することで、モジュール型ラジアル基底関数ネットモデルに比べ、汎化能力が改善された。

## (4)特徴空間を知識移転するマルチタスク・パターン認識モデルの開発

逐次マルチタスク学習問題に対し、過去のタスクで得られた特徴空間を新しいタスクに選択的に知識移転する方式を開発した。具体的には、過去に得られた判別軸のクラス分離性を計算し、現タスクのクラス分離性を確実に高める判別軸のみを選択的に知識移転する方式を考案した。これにより、従来の追加学習型線形判別分析(ILDA)で得られる判別軸が(クラス数-1)に制限されていた問題を解消するとともに、少ない訓練データでクラス分離性の高い特徴空間を構成できるようになった。機械学習で通常用いられるベンチマークデータを用い、得られた判別特徴空間の有効性を識別率で評価した。その結果、提案アルゴリズムによって、新しいタスクに判別軸が効果的に追加され、知識移転がない従来アルゴリズムに比べて認識率が大幅に改善された。

## (5)顔画像認識に基づく個人認証システムへの実装

本研究で提案した特徴空間を知識移転するマルチタスク・パターン認識モデルや、画像を二次元情報のままで特徴抽出可能なように拡張したモデルを個人認証システムに実装した。その結果、判別ベクトルで張られる特徴空間を知識移転することで、少ない訓練データで高い汎化能力が得られることを計算機実験を通して示した。また、入力画像を一次元ベクトル変換することなく、二次元情報のままで主成分分析を行うことで、追加学習を高速に行えることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計31件)

- [1]Young-Min Jang, Minh Lee, Seiichi Ozawa, A Real-time Personal Authentication System Based on Incremental Feature Extraction and Classification of Audiovisual Information, *Evolving Systems*, 査読有 (in press)
- [2]太田良平, 小澤誠一, オンライン特徴抽出を行う追加型再帰フィッシャー線形判別の改良, 電気学会論文誌C, 査読有 (印刷中)
- [3]Takaomi Tokumoto, Seiichi Ozawa, A Fast Incremental Kernel Principal Component Analysis for Learning Stream of Data Chunks, *Proc. of Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 査読有 (in press)
- [4]Chunyu Liu, Young-Min Jang, Seiichi Ozawa, Minh Lee, Incremental 2-Dimensional Linear Discriminant Analysis for Multitask Pattern Recognition, *Proc. of Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 査読有 (in press)
- [5]Yonghwa Choi, Takaomi Tokumoto, Minh Lee, Seiichi Ozawa, Incremental Two-dimensional Two-directional Principal Component Analysis for Face Recognition, *Proc. of Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 査読有 (in press)
- [6]Hitoshi Nishikawa, Seiichi Ozawa, Radial Basis Function Network for Multitask Pattern Recognition, *Neural Processing Letters*, 査読有, Vol. 33, No. 3, pp. 283-299, May 2011.
- [7]Seiichi Ozawa, Ryohei Ohta, Incremental Recursive Fisher Linear Discriminant for Online Feature Extraction, *Proc. of IEEE Workshop on Evolving and Adaptive Intelligent Systems*, 査読有, pp. 70-76, April 2011.
- [8]Takashi Nagatani, Seiichi Ozawa, Shigeo Abe, Fast Variable Selection by Block Addition and Block Deletion, *J. Intelligent Learning Systems and Applications*, 査読有, Vol. 2, No. 4, pp. 200-211, December 2010.
- [9]Seiichi Ozawa, Toshihisa Tabuchi, Sho Nakasaka, Asim Roy, An Autonomous Incremental Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks, *J. Intelligent Learning Systems and Applications*, 査読有, Vol. 2, No. 4, pp. 179-189, December 2010.
- [10]小澤誠一, 岡本圭介, 局所線形回帰による動径基底関数ネットの高速追加学習, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 130, No. 9, pp. 1667-1673, 2010年9月
- [11]Seiichi Ozawa, Yohei Takeuchi, Shigeo Abe, A Fast Incremental Kernel Principal Component Analysis for Online Feature Extraction, in *PRICAI 2010: Trends in Artificial Intelligence*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 査読有, Springer, pp. 487-497, September 2010.

- [12]Young-Min Jang, Seiichi Ozawa, Minho Lee, A Real-Time Personal Authentication System with Selective Attention and Incremental Learning Mechanism in Feature Extraction and Classifier, in *PRICAI 2010: Trends in Artificial Intelligence*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 査読有, Springer, pp. 445-455, September 2010.
- [13]Masayuki Hisada, Seiichi Ozawa, Kau Zhang, Nikola Kasabov, Incremental Linear Discriminant Analysis for Evolving Feature Spaces in Multitask Pattern Recognition Problems, *Evolving Systems*, 査読有, Vol. 1, No. 1, pp. 17-27, August 2010.
- [14]Seiichi Ozawa, Sho Nakasaka, Asim Roy, An Autonomous Incremental Learning Algorithm of Resource Allocating Network for Online Pattern Recognition, *Proc. World Congress on Computational Intelligence*, 査読有, pp.706-71, July 2010.
- [15]小澤誠一, 竹内洋平, 阿部重夫, 追加学習型カーネル主成分分析によるオンライン特徴抽出, 電子情報通信学会論文誌D「情報爆発特集号」, 査読有, Vol. J93, No. 6, pp. 826-836, 2010年6月
- [16]Makoto Murata, Seiichi Ozawa, A Reinforcement Learning Model Using Deterministic State-action Sequences, *Int. J. of Innovative Computing, Information and Control*, 査読有, Vol. 6, No. 2, pp. 577-590, February 2010.
- [17]津守研二, 小澤誠一, 動的環境下で複数タスクを学習するニューラルネットモデル, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 130, No. 1, pp. 21-28, 2010年1月
- [18]Seiichi Ozawa, Keisuke Okamoto, An Incremental Learning Algorithm for Resource Allocating Networks Based on Local Linear Regression, in *Neuro-Information Processing*, 査読有, Lecture Notes in Computer Science 5863, Springer, pp.562-569, December 2009.
- [19]Kazuya Morikawa, Seiichi Ozawa, Shigeo Abe, Tuning Membership Functions of Kernel Fuzzy Classifiers by Maximizing Margins, *Memetic Computing*, 査読有, Vol. 1, No. 3, pp. 221-228, September 2009.
- [20]Toshihisa Tabuch, Seiichi Ozawa, Asim Roy, An Autonomous Learning Algorithm of Resource Allocating Network, In *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2009*, Lecture Notes in Computer Science 5788, 査読有, Springer, pp. 134-141, October 2009.
- [21]Hiroshi Onda, Seiichi Ozawa, A Reinforcement Learning Model Using Macro-actions in Multi-Task Grid-World Problems, *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, 査読有, 6 pages, September 2009.
- [22]Ryohei Ohta, Seiichi Ozawa, An Incremental Learning Algorithm of Recursive Fisher Linear Discriminant, *Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 査読有, pp. 2310-2315, June 2009.
- [23]Seiichi Ozawa, Yuki Kawashima, Shaoning Pang, Kasabov Nikola, Adaptive Incremental Principal Component Analysis in Nonstationary Online Learning Environments, *Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 査読有, pp. 2394-2400, June 2009.
- [24]Shaoning Pang, Seiichi Ozawa, Nik Kasabov, Curiosity Driven Incremental LDA Agent Active Learning, *Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 査読有, pp. 2401-2408, June 2009.
- [25]Seiichi Ozawa, Kazuya Matsumoto, Shaoning Pang, Nikola Kasabov, Incremental Principal Component Analysis Based on Adaptive Accumulation Ratio, in *Advances in Neuro-Information Processing*, Lecture Notes in Computer Science 5506, 査読有, Springer, Part I, pp. 1196-1203, July 2009.
- [26]Hitoshi Nishikawa, Seiichi Ozawa, Asim Roy, A Neural Network Model for Sequential Multitask Pattern Recognition Problems, in *Advances in Neuro-Information Processing*, Lecture Notes in Computer Science 5506, 査読有, Springer, Part I, pp. 821-828, July 2009.
- [27]Masayuki Hisada, Seiichi Ozawa, Kau Zhang, Shaoning Pang, Nikola Kasabov, A Novel Incremental Linear Discriminant Analysis for Multitask Pattern Recognition Problems, in *Advances in Neuro-Information Processing*, Lecture Notes in Computer Science 5506, 査読有, Springer, Part I, pp. 1163-1171, July 2009.
- [28]恩田宏, 小澤誠一, Grid-World迷路問題においてマクロアクション生成機能を有する強化学習モデルとその学習特性に関する考察, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 129, No. 4, pp. 737-743, 2009年4月
- [29]Seiichi Ozawa, Asim Roy, Dmitri Roussinov, A Multitask Learning Model for Online Pattern Recognition, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 査読有, Vol. 20, No. 3, pp. 430-445, March 2009.
- [30]Seiichi Ozawa, Asim Roy, Incremental Learning for Multitask Pattern Recognition Problems, *Proc. of 7th Int. Conf. on Machine Learning and Applications*, 査読有, pp. 747-751, December 2008.
- [31]Seiichi Ozawa, Shaoning Pang, Nikola Kasabov, Incremental Learning of Chunk Data for On-line Pattern Classification Systems, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 査読有, Vol. 19, No. 6, pp. 1061-1074, June 2008.

[学会発表] (計 18 件)

- [1] 小澤誠一, 太田良平, 追加学習型再帰フ  
ィンチャー判別分析によるオンライン特徴  
抽出, 第 20 回インテリジェントシステムシ  
ンポジウム, 2010 年 9 月
- [2] 高田丈靖, 小澤誠一, パターン認識にお  
ける半教師有りマルチタスク学習モデルの  
開発, 第 37 回知能システムシンポジウム,  
2010 年 3 月
- [3] 田淵敏久, 小澤誠一, RBF ネットワークの  
自動追加学習アルゴリズム, 第 21 回自律分  
散システム・シンポジウム, pp. 221-226,  
2009 年 1 月
- [4] Seiichi Ozawa, Kazuya Matsumoto, Shaoning  
Pang, Nikola Kasabov, An Incremental  
Principal Component Analysis Based on  
Dynamic Accumulation Ratio, Proc. of SICE  
Annual Conf. 2008, CD-ROM, August 2008.  
(その他, 14 件)

[図書] (計 2 件)

- [1] Seiichi Ozawa, Shaoning Pang, Nikola  
Kasabov, Online Feature Extraction for  
Evolving Intelligent Systems, in *Evolving  
Intelligent Systems: Methodology and  
Applications*, Plamen Angelov, Dimitar P. Filev,  
Nik Kasabov, Eds, Wiley-IEEE Press, pp.  
151-172, March 2010.
- [2] Seiichi Ozawa, Shigeo Abe, Shaoning Pang,  
Nikola Kasabov, Online Incremental Face  
Recognition System Using Eigenface Feature  
and Neural Classifier, in *State of the Art in Face  
Recognition*, Julio Ponce and Adem Karahoca,  
Eds., IN-TECH, pp. 87-108. January 2009.

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小澤 誠一 (OZAWA SEIICHI)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70214129

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 連携研究者

カザボフ ニコラ (Kasabov Nikola)  
オークランド工科大学 (ニュージーランド)・  
Knowledge Engineering & Discovery  
Research Institute・教授

ロイ アシム (Roy Asim)

アリゾナ州立大学 (米国)・

W.P. Carey School of Business・教授