

SAILING: Smart Architecture and Integration Lead Intelligence to the Next Generation

Biomedical Technology  
/ FA and High-speed Inspection

Dynamic Interaction

Vehicle / ITS

High-speed Archiving

Security

## 高速画像処理を用いた 知能システムの応用展開

Application field development of Dynamic  
intelligent systems by using high speed vision

# 2021

# CONTENTS

## 高速画像処理の基本思想と事業化

### 毎秒 1000 コマで動く知能システム ..... 4

#### 高速画像処理が開く未来

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

石川正俊 特任教授

## ACCEL プロジェクトの推進

### 知能システムを世に送り出す ..... 6

#### 成果を提示し、社会受容性を判断する

科学技術振興機構 (JST) ACCEL

岸則政 プログラムマネージャー

## 視覚表現の常識が変わるディスプレイ

### エンタメやファッションを視覚から変える ..... 8

#### ダイナミックプロジェクションマッピングを実現する高速プロジェクター

東京工業大学 工学院

渡辺義浩 准教授

### 身の回りの紙面を瞬時にタブレット端末に変える ..... 10

#### 運動追従投影機能を内蔵するインテリジェント高速プロジェクター

東北大学 大学院情報科学研究科

鏡慎吾 准教授

### 新型コロナ禍でタッチレス空中 インターフェースの注目度が急上昇 ..... 12

#### シースルー構造を有する全周型インターフェースの開発

宇都宮大学 工学部

山本裕紹 教授

## 高度化が進む高速 3 次元形状計測

### 動く物体を高速スキャニング ..... 14

#### 超高速携帯型 3 次元スキャナーの開発

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

田畑智志 特任助教

### 物体の「質感」を取得して操る ..... 16

#### 人の知覚を超えた高速情報システムの構築

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

宮下令央 特任講師

## 応用分野が広がる高速画像処理

- トンネル内などのインフラ点検を  
走行しながら高精度・低コストで実施** ..... 18  
高速画像処理を用いた浮き・剥離検査システム

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門  
早川智彦 特任准教授

- 焦点が異なる複数の画像を同時に撮影** ..... 20  
露光タイミング制御による任意フォーカス技術

群馬大学 大学院理工学府  
奥寛雅 教授

- 負担の少ない眼底カメラ、  
リモート診断のツールとしても期待** ..... 22  
自撮りできる高速ビジョン応用小型眼底カメラ

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科  
太田淳 教授

## 自動運転に貢献する高速画像処理

- 高精度な自動運転をサポート** ..... 24  
高速ビジョンを用いた車載画像処理システム

広島大学 大学院先進理工系科学研究科  
妹尾拓 准教授

## ヒューマンインターフェースの新展開

- 高速広域計測投影システムにより  
スポーツ支援や生物の健康管理が可能に** ..... 26  
光学系を駆使した広域かつ高速に動くモノの画像計測

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門  
末石智大 特任講師

- 人間と機械が協調して高精度・高効率作業を実現** ..... 28  
人間の知能と機械の高速・高精度を一体化する

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門  
黄守仁 特任講師

## 新機能が生まれるセキュリティーシステム

- 人の正面顔を正確に認識する  
セキュリティーシステムの実現** ..... 30  
高速カメラと分散処理技術による高速ビジョンネットワーク

東京大学 大学院情報学環・学際情報学府  
山川雄司 准教授

- カメラ1台で複数台の役割を果たす監視システム** ..... 32  
高速ビジョン技術によるトラッキング型広域監視システム

広島大学 大学院先進理工系科学研究科  
石井抱 教授

# 毎秒 1000 コマで動く知能システム

## 高速画像処理が開く未来

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

石川正俊 特任教授



未来の知能システムは、人間ではなく“機械の時間”で動かす必要がある——。高速画像処理の研究で世界のトップを走る東京大学特任教授の石川正俊さんは、「高速性」を武器に数々のシステムを世に送り出してきた。勝率100%の「じゃんけんロボット」や、毎分250ページという高速で本をスキャンできる装置などは有名でメディアで目にした人もいるだろ

う。動画共有サイト「ユーチューブ」に投稿した動画は海外からのアクセスも多い。

### 「人間の目」がかったの基準

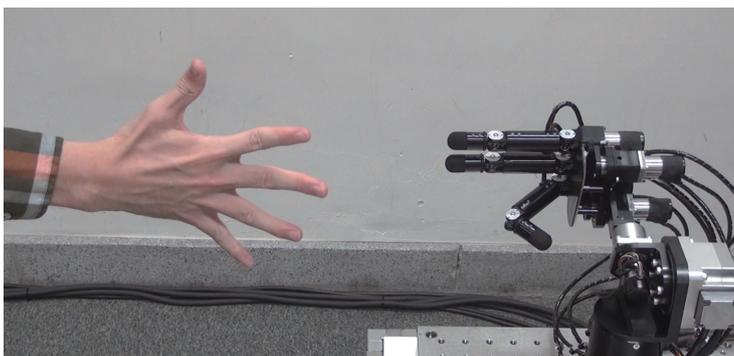
毎秒1000コマ(1000fps)のスピードで画像処理する技術が石川グループ研究室のコアテクノロジーになっているが、これは従来の発想ではあり得なかったことだった。かつて画像処理と言えば、人間の目の認識速度と同じ毎秒30コマ程度の速さがその基準だった。人間の目がこれ以上の速さには反応できないからだが、機械の軸で見るとこれでは遅すぎる。

画像の認識は、そもそも時間がかかるものと多くの研究者が諦めていた。これに対し、石川さんは「ロボットを的確に制御しようとしたら、毎秒1000コマ、すなわち1ミリ秒間隔で画像処理しないと間に合わない」と、当時は無謀だと思われていた画像処理の大幅な高速化を目指した。1988年

のことだ。

初めて毎秒1000コマの速度で動かすことに成功したのが、93年にスケールアップモデルとして開発した並列ビジョンシステムだ。99年にはLSIとしてワンチップ化したが、当時の分解能は64画素×64画素だった。その後ソニーと共同で開発し、「半導体のオリンピック」と呼ばれる2017年の国際会議(米ISSCC)で発表したCMOSイメージャは1296画素×976画素の分解能を達成。高速で画像処理できる積層型の小型チップは大きな話題を集めた(毎秒1000コマでは31万画素)。

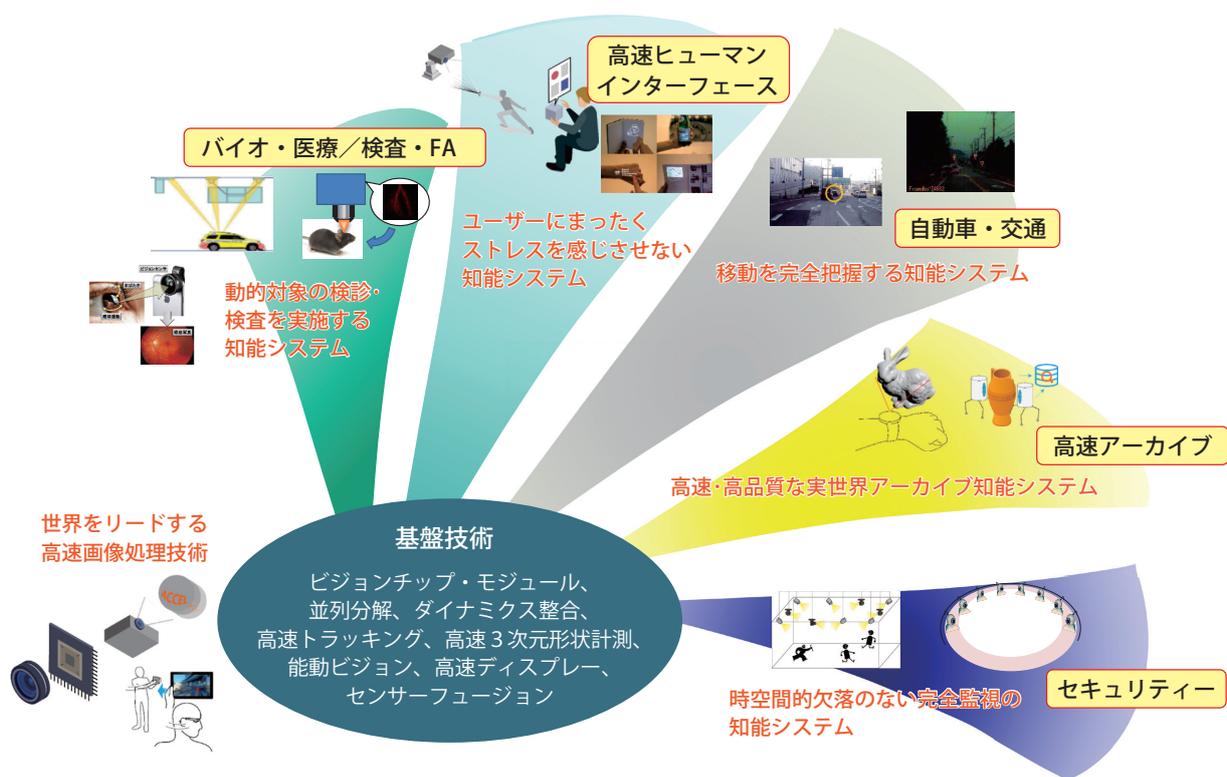
もっとも画像処理の高速化だけでは知能システムは実現できない。高速演算が可能な並列コンピューターを整備し、続いてモーターを改良してアクチュエーター全体の高速化に取り組んだ。さらに表示用ディスプレイの処理速度も向上し、「周辺技術も併せて高速化を達成することで、30年前に思



絶対に負けない——勝率100%の「じゃんけんロボット」



実用化されたソニーのチップを使った高速ビジョンカメラ。並列処理回路を内蔵し、高速画像処理を実行できる



高速ビジョンが目指す応用展開

「描いた世界がようやく実現した」と石川さんは感慨深げだ。

## 高機能化ではなく高速化が鍵

現在の人工知能（AI）は、ディープラーニング（深層学習）など新しいアルゴリズムを使った高機能化の研究がその潮流になっている。一方、まず高速化にめどをつけた石川さんは「このアプローチが当たった」とみる。高速に動けば機能は後からでも高められるが、「高機能なものを高速化するのは極めて困難」だからだ。

石川さんは人間の知能や動作をまねるのがAIや知能ロボットではないと考え、人間の能力をはるかに超えた、機械の時間軸で開発を進めるべきだと指摘する。「虎に遭遇したら、私たちのロボットはそれを認識する前にサツと逃げる。一方、普通のロボットは、それが何であるかをのんびりと認識している間に食われてしまう」。そんな比喻で語られることもある。

「機械にとっての限界の速さで動く、日本発の知能ロボットを世界に広

めるのが夢」と語る石川さん。高速化の導入によって、日本は工場の生産ラインやロボット、自動車などの得意分野で世界を凌駕することができると確信する。今後は高機能化や低コスト化を進め、社会で活用するステージへと移る。

将来、工場のラインなどが高速化を実現し、自動化率が100%に近づけば、社会は一変する。人間による労働が不要になり、工場は過疎地に作られる。グローバルに見れば、労賃に左右されなくなることから、製造拠点の日本回帰が進むだろう。その結果、技術の流出やサプライチェーン（供給網）の寸断といった多くの問題が解消され、日本の製造業の競争力を向上できると石川さんは期待している。

## 社会受容性の追求

ACCELでは、高速画像処理を使ったさまざまな知能システムを開発し、それをPOCとして社会に提示して事業化が可能かどうかの「社会受容性」を判断している。その役割を担うの

が、2016年に石川さんらが設立した、ソニーや日産自動車など210組織で構成する「WINDSネットワーク」だ。基礎研究から始めて開発した技術を応用して事業化するという、従来の古典的な「リニア（直線型）モデル」ではもう世の中の変化には追いつけない。

石川さんは「ニーズがわかるというのは妄想で、未踏の領域ほど潜在化したニーズはわからない」と考えており、それゆえに新しい技術はその都度社会の意見を聞き、反応があれば事業化へと一直線に進める。そこには「価値を決めるのは社会」との認識がある。複数の研究を走らせつつ、同時に事業化を模索するこの新しい研究開発の手法を、石川さんは「並列スパイラル（らせん型）モデル」と呼び、日本に定着させたいと意気込んでいる。

高速画像処理を基盤にして、企業と歩調を合わせながら新たな知能システムを創造する。それによってもう一度、日本が世界をリードしたい。それが石川さんの願いであり、後に続く者に課せられた責務でもある。

# 知能システムを世に送り出す

## 成果を提示し、社会受容性を判断する

科学技術振興機構（JST）ACCEL

岸則政 プログラムマネージャー



プログラムマネージャー（PM）として、ACCELのプロジェクトを成功に導いた岸則政さん。世界をリードする高速画像処理の研究開発をマネジメントし、技術的成立性の証明と提示（POC）を通じて事業化へつなげるといふPMの任務を全うした。「優秀な研究者たちと同じ目標に向かって新しいものを生み出す、その知的活動は楽しいものだった」と岸さんはこの5年間を振り返る。

### 高速画像処理で自動車が変わる

岸さんは日産自動車に40年近く勤め、主に総合研究所で自動車の電子化（カーエレクトロニクス）の研究に一貫して取り組んだエキスパートだ。音声認識を初めて自動車へ搭載したほか、上空から見下ろしたような地図を示すバードビュー・ナビゲーション、車の周囲を表示するアラウンドビュー・モニターの開発などを手が

け、画像処理の応用でも豊富な経験と実績を持つ。

東京大学特任教授の石川正俊さんとの交流の始まりは、岸さんが研究室を訪ねた15年ほど前にさかのぼる。自動車分野の画像処理は今でも毎秒30～50コマの速さが主流だが、岸さんは、当時すでに毎秒1000コマ（1000fps）で動いていた石川グループ研究室の「じゃんけんロボット」を見て衝撃を受けたという。

画像処理の高速化の効果は自動車分野で考えるとわかりやすい。例えば、

衝突被害軽減ブレーキは、前方の車や歩行者などをカメラで検知し、危険性が高まるとドライバーへ警告したり、ブレーキの補助操作などを行う仕組みだ。そこに毎秒1000コマの高速カメラを導入すると、「障害物が時速20キロメートルの速さで飛んできた場合、従来システムよりも55センチメートル手前で車を止めることができる」（岸さん）。高速な画像処理により、ものの認識だけでなく、動きの予測まで可能になることを岸さんは早くから予見していた。

#### 共通基盤技術：高速画像処理

- 0-A：高速ビジョンモジュールの開発
- 0-B ①：高速プロジェクターモジュールの開発
- 0-B ②：高速プロジェクターモジュールの開発
- 0-B ③：高輝度化カラープロジェクターの開発

#### 自動車・交通

- 1-A：自車両位置の完全把握：交差点通過
- 1-B：交通流の把握：信号機認識
- 1-C：周囲環境の安全把握：重畳する移動体の識別

#### 高速ヒューマンインターフェース

- 2-A：没入型高速3次元ダイナミックインタラクション基盤
- 2-B：ダイナミックインタラクションに基づくスポーツ支援
- 2-C：ダイナミックインタラクションに基づく先読み・先回り支援

#### バイオ・医療／検査・FA

- 3-A：3次元の動き・形を細胞の活動中に捉えるバイオイメージング装置
- 3-B ①, ②：被験者非拘束微小領域計測操作支援システム
- 3-C：構造物インフラ維持のための移動体型検査装置

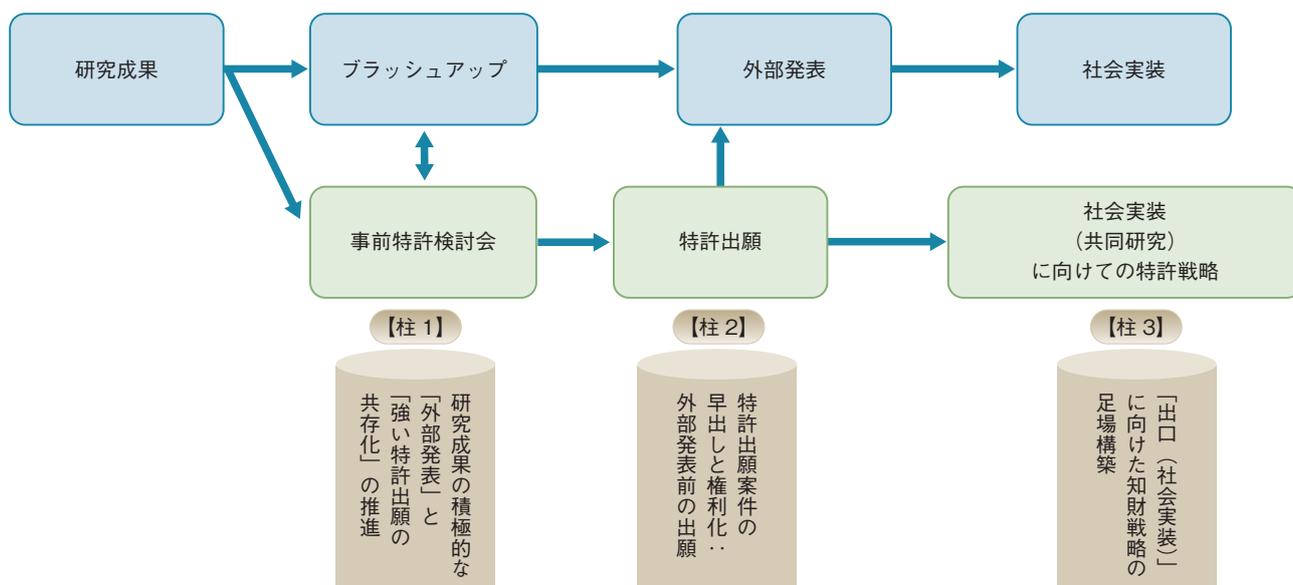
#### 高速アーカイブ

- 4-A：超高速携帯型3次元スキャナーの開発
- 4-B：運動中に物体の視覚的質感を完全取得するシステム
- 4-C：デジタルライブラリーに向けた工芸品アーカイブ装置

#### セキュリティ

- 5-A：高速ローカルビジョンネットワークの構築
- 5-B ①, ②：トラッキング型広域監視システムの開発

POC一覧



特許のプロセス

## 優れた知財戦略

ACCELは、世界で勝てるナンバーワンの技術を「加速させる」ことによって市場の開拓を目指すプロジェクト。岸さんは高速画像処理を使った知能システムの開発プログラムを推進し、実用化への道筋を整えた。特筆すべきはその広い応用範囲だ。「私たちの願いは技術を発展させて新しい分野を切り開くこと。“選択と集中”はあえてしなかった」と岸さんは語る。

プロジェクトではバイオや医療、FA（ファクトリーオートメーション）や検査分野のほか、高速ヒューマンインターフェース、自動車・交通、高速アーカイブ、セキュリティといった応用分野に向けて、基盤技術を含む約20のPOCテーマの研究開発を進めてきた。知能システムの土台となる基盤技術と、応用展開の二段構えで取り組んだことも特徴だろう。

中でも岸さんが特に力を入れたのが知財戦略だ。発明推進協会からアドバイスを受け、さらに外部の特許調査会社も活用しつつ、特定の技術やそれを使った製品、生産などの関連特許を調べ、評価する特許ポートフォリオを構築した。各領域でコアとなる重要特許

はすべて出願しており、全体で20数件の特許を取得済みという。

岸さんは「大学が中心となる研究プロジェクトでは、特許がおざなりになっていることが多い」と日本の弱点を指摘する。特許を取得していないと、研究成果がビジネスを生んでも利益につながらず、特に学会発表後では手遅れになりかねない。今回は論文を発表する前に関連特許を調査し、特許出願に関して細部まで話し合う、全7大学が参加する「特許検討会」をたびたび開いて議論した。特許の運用管理を含めた大学の知財戦略の手本になるかもしれない。

実用化に向けては、PMとしての独自の市場調査により、「高速画像処理が将来、大化けして次世代知能システムの普及の起爆剤になる」と考えている。石川さんが提案する「並列スパイラルモデル」をベースに、WINDSネットワークを活用して研究成果を企業に売り込んでおり、確かな手応えもある。

## AIとの融合で完璧に

現在、毎秒30コマで画像処理しているテレビやカメラは、10年後には毎秒200コマ以上で動いているだろ

う。工場では毎秒1000コマで撮影可能なカメラがロボットに搭載されているのではないかと。岸さんはそう予測し、「石川先生が描くビジョン通りに世の中が変わってくるはず。自動運転にも高速画像処理が必ず使われる」と期待する。

かの有名な飲食店が掲げる「はやい、やすい、うまい」になぞらえて言うなら、「はやさ」はすでにクリアし、ソニーによる高速ビジョンチップの開発で「やすい」も解決しつつある。この先は「うまく」、つまり役立つ、汎用的といった観点での研究が課題となるが、これは高速画像処理での高速計測と高速トラッキングに加え、人工知能（AI）や機械学習の導入による対象物の識別・認識で十分実現可能であり、やがて完璧なシステムができると岸さんは見通す。

ACCELはその技術力の高さはもちろんだが、社会にいち早く成果を示し、その受容性を判断した上で実用化戦略を練るといふ、研究開発の新しい枠組みを広めた意義も大きい。岸さんはこれらの技術の行く末を見守りつつ、今後は自身が立ち上げた岸未来研究所で新たな研究テーマに挑むつもりだ。

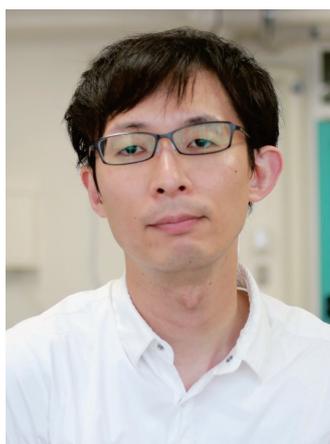
視覚表現の  
常識が変わる  
ディスプレイ

# エンタメやファッションを 視覚から変える

## ダイナミックプロジェクションマッピングを 実現する高速プロジェクター

東京工業大学 工学院

渡辺義浩 准教授



ステージ上で踊っているアイドルの衣装の色や模様がパッと変わったり、舞台上で演じている美しい天女の表情が一瞬のうちに鬼のような形相に変化したり——。東京工業大学准教授の渡辺義浩さんは、新たにさまざまな物体への「ダイナミックプロジェクションマッピング」に成功するとともに、さらに高速カラープロジェクターの実現によってカラー投影にも成功した。



カラー化した高速プロジェクター

### 書物の高速データ化を実現

渡辺さんは、東京大学の石川グループ研究室時代から高速で物体を撮影し、それを即座に情報として処理し、さらに瞬時にそれを活用する研究に取り組んできた。2018年に東大から東工大へ移ってから、さらなる高度化を進めている。

「私たちが取り組んでいるのは、センシングやコンピュータビジョンを利用した、機械の目となるカメラの技術開発です。身近なものでは、スポーツ中継のスローモーション映像。ただし、それと大きく異なるのは、撮影したものを瞬時に処理するという。これをイメージできない人からは『撮影してからゆっくり処理すればいいんじゃない』と言われてしまう」と渡辺さん。

確かに人間の視覚認知能力は毎秒30コマ(30fps)程度。動体視力が優れている人でも毎秒60コマと言われている。それを超えると、例えばパラパラ漫画がアニメーションに変わる。ところが人間の目では捉えられないものを機械の目で捉えて活用できれば、人間にとってリアルタイムと感じる経験や現象につなげることが可能となる。

渡辺さんは、これまで人類が残してきた文化遺産のアーカイブ化も手がけてきた。例えば書物のデータ化だ。しかし、アーカイブ化が遅れば遅れるほど、火災などの不慮の事故により、

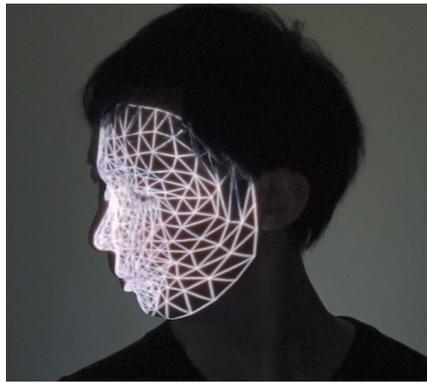
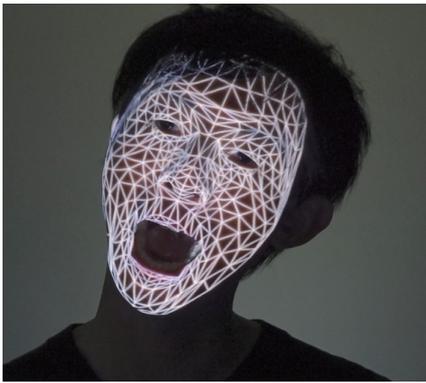
失われる可能性が高くなるにもかかわらず、ここにも「スピードは必要ない」という固定観念が残っている。

「イタリアの知人は、『ローマ時代からの書物が数十～数百キロメートルもある』と表現する。何冊ではなくて、積み上げるとそれくらいの高さになるということらしい(笑)」

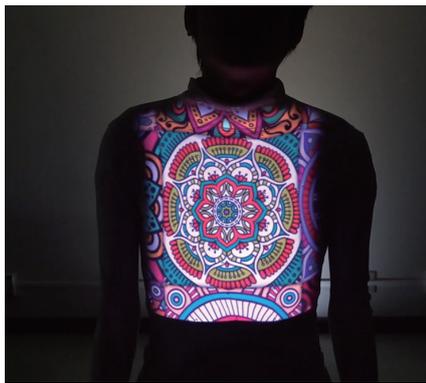
これまでのように一般的なフラットヘッドスキャナーで作業していたら、膨大な時間と労力が必要になる。そこで渡辺さんは、東大石川グループ研究室時代に風を使って書物のページをめくり、瞬間の画像をスキャニングし、ページのゆがみも自動的に補正して記録する技術を開発した。これにより1分間に250ページという速度でデータ化することが可能になった。一般的な文庫本であれば1冊を1分間程度でデータ化できる計算になる。将来は、生物そのもののアーカイブ化も視野に入れているという。

### 3D映像の質感まで再現

こうした高速画像処理の技術を、プロジェクションマッピングに生かし、AR(拡張現実)の世界を提供しようというのが渡辺さんのもう一つの取り組みだ。例えば白いTシャツに画像(模様)を投影。Tシャツには人間の目には識別できない赤外線のマーカーが印刷されていて、それを追うことで常にTシャツの正面に模様を投影され、さらに生地伸び縮みに合わせて投影された模様も伸び縮みする。



顔に投影した映像は、目、鼻、口を追って顔の向きや傾き、表情に合わせた映像になる



Tシャツには目に見えないマーカースがある、それを追うことで人の動きに追従して画像を投影。生地伸び縮みに合わせて、投影した画像も伸び縮みする

また、人間の脳は物体の反射特性を記憶していて、物体を識別している。ピカピカ、テカテカ、ザラザラ、ツルツル…。光の強さとそれがどのように反射しているかによって、「金属みたいだ」とか、「プラスチックかも」とか、「布だな」といったことを触らなくても予測することができるのだ。これを逆手に取り、3次元（3D）物体に重畳投影する映像にツルツルした光の反射具合まで再現すれば、あたかもそこにプラスチックの物体があるように見え、さらに、物体が動いた時に変化する光沢の様子も動的に再現が可能だ。

数年前に「ポケモンGO」というスマートフォン用アプリケーションが話題になった。これはスマホの中にポケモンを出現させたただけだが、渡辺さんの技術を使えば、ポケモンの見た目を実際の3Dの物体に投影して、サラサラとした毛並みや肉感まで再現することができる。あたかも目の前に実物の

ポケモンがいるように見える。

### カラー化で エンタメ業界から注目

今回、ACCELで渡辺さんは東京大学と共同で高速プロジェクターのカラー化に成功した。カラー化のためには、赤（R）、緑（G）、青（B）の3色を挟み込まなければならないが、光源をRGBに変えただけでは駄目で、光の更新をモノクロの3倍の速度で行わなければならない。3倍の速度向上を実現するために、光源の変調を高速化するとともに、機械的な制御との同期を高精度化した。さらに、強力な光源を導入するとともに、高速投影に最適化された光学系を新たに設計することで高輝度化も達成した。また、レンズを機械的に動かして焦点を合わせるのではなく、スピードの限界がある。そこで液体可変焦点レンズを採用し高速で焦点を制御することで、対象物が奥行方

向に動いても常に焦点が合った画像を投影できる。

今後の改良点について、渡辺さんは「一定の成果は出ているが、より高輝度化を進める必要があるし、小型化して手軽にモバイルツールとして使えるようにしていきたい。また、物体を照らした時に、その向こうには影ができてしまう。プロジェクターが作り出した仮想の影と区別して、私たちは『リアル影』と呼んでいるが、プロジェクターの台数を増やし、角度を変えて照らすことでリアル影を消すことにも取り組んでいきたい」と話す。

渡辺さんの技術は、すでにエンターテインメント界やアート界から注目を集めている。アミューズメント施設のアトラクションにも活用できそうだ。すでにファッションや化粧、インテリアの業界からの問い合わせもあるという。今後、遊びやおしゃれの形が大きく変わるかもしれない。

視覚表現の常識が変わるディスプレイ

# 身の回りの紙面を瞬時にタブレット端末に変える

## 運動追従投影機能を内蔵するインテリジェント高速プロジェクター

東北大学 大学院情報科学研究科

鏡慎吾 准教授



誰でも持っているスマートフォンがプロジェクターの役割を果たすようになるかもしれない。スマホを動かしても、映像はブレない。反対に投影しているスクリーンを動かしたとしても、その映像は形も大きさも変えずスクリーンを追いかけていく。しかもスク

リーンが高速で動いたとしても、映っている映像は遅れずにピタリと追従していくような夢のプロジェクターだ。

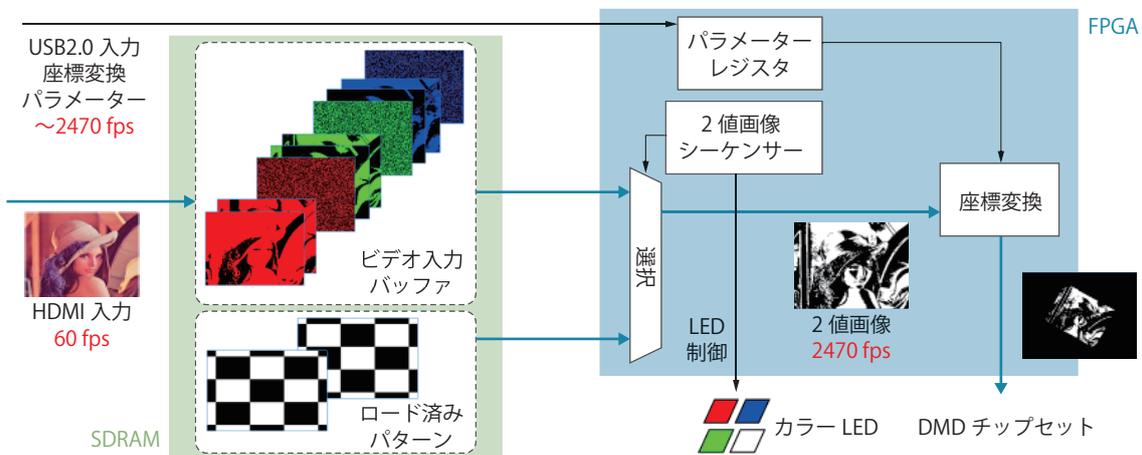
これまではプロジェクターとスクリーンの設置には、距離や角度を計算して、さらにしっかりと固定しなければならず、手間も時間もかかっていた。この技術を使えば、誰でも手軽にプロジェクターを利用できるようになる。東北大学准教授の鏡慎吾さんは、ACCELで「運動追従投影機能を内蔵するインテリジェント高速プロジェクター」の基礎技術となるハードウェアとソフトウェアの実装を実現した。

### プロジェクションマッピングシステムの構築

鏡さんは、高速に切り替わる映像を投影するプロジェクターの研究に長年携わってきた。しかし、研究を始めた

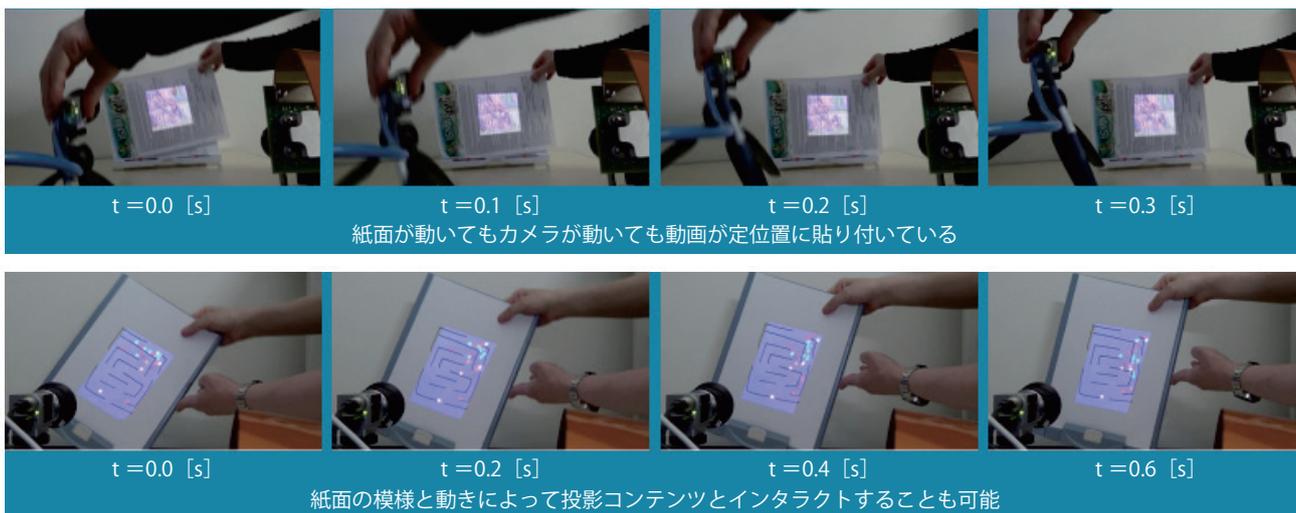
当初はプロジェクターの高速化は必要ないものと考えられていた。なぜなら人の目はそれほど速い映像についていけないからだ。鏡さんは「人の目では必要なくても、高速処理ができるカメラと組み合わせれば、何か面白いことができるかもしれない」と考えたという。それがプロジェクションマッピングシステムのベースになっている。

鏡さんが最近実現したのは、投影された画像が、その対象（スクリーン）の動きとインタラクション（相互作用）するプロジェクションマッピングシステムの構築だ。イメージしやすいように、具体的な例をあげてみる。画用紙に迷路を手書きしてプロジェクターに面を向けて持つ。そこにプロジェクターで迷路内を動き回るコマを投影する。画用紙を傾けると、コマは迷路に沿って高い所から低い所へ



赤、緑、青の画像を高速で切り替えて投影すると3色が混ざってカラーになる。その1枚1枚を対象物体の動きに合わせて変形することで遅延のないプロジェクションマッピングが可能になる

運動追従投影機能を内蔵するインテリジェント高速プロジェクターの内部構成



### 高速プロジェクションマッピングの動作

向かって転がり、迷路のラインが切れたところまで来ると、穴に落ちるような動きをする。画用紙を勢よく振れば、コマが迷路内を弾むように動く。

動きの検出から投影までに時間がかかると、対象の動きについていけず、コマが迷路のラインや画用紙からはみ出すような動きになってしまう。アプリケーションが行う映像生成を高速化し、高速映像を受け付けるプロジェクターを使うことにすれば、これは解消されるが、今度はアプリケーション側の負担が大きくなる。そこで、鏡さんは、今回、ハードウェアとソフトウェアの両面からシステムを再構築した。

### ハードとソフト両面から改良

まずハードウェア面からのアプローチを説明していこう。鏡さんのシステムは、世間の大抵のプロジェクターと同様にデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を採用している。DMD は2値画像が高速に切り替わることによって、観察者の目にはカラー映像に見えるというもの。単純に言えば、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) 3色のパラパラ漫画。それぞれ単色で描かれた絵柄を、毎秒数千から数万コマで繰り返すことによって、色が混ざり合ってカラーに見えるのだ。

鏡さんのシステムは毎秒 2400 コマ

(2400fps) で動作するが、遅延のない追従を実現するため、その1コマ1コマをスクリーンの動きに合わせて変形させる機能を内蔵した。これにより、アプリケーションは通常のビデオゲームなどと同様に毎秒 60 コマの映像を生成するだけでよくなり、映像処理の負担の解消につながった。一方、スクリーンに合わせた映像の変形制御は、映像自体の生成とは独立に高速に行えるので、その制御さえ遅延なく正確に行えれば、動き回るコマが迷路のラインをはみ出すことはない。

その変形制御のためのソフトウェア面の工夫として、高速で投影している画像の中に、周期的にチェス盤のような白と黒の市松模様を挟み込んだ。周期は 2400fps で繰り返す中の 6 フレームに 1 回の割合。市松模様は速すぎて人間の目では認識できないが、高速カメラはしっかりと捉えている。これを平面に直角に投影すれば、模様は正方形。傾けると台形やひし形になる。また平面が上下左右に動くと、平面上に描かれた迷路のラインと投影された模様の位置関係にズレが生じる。これらを瞬時に解析し、投影する映像を修正するため、人の目には遅れているようには見えない。映像がピタリと貼り付いて見えるのだ。

これまでではプロジェクターとカメラ

を精密に位置合わせしておいたり、対象にマーカーを設置しておく必要があった。それが今回はプロジェクションマッピング制御によって、自動的に行えるようになった。

### いつでも、どこでも使える

今後は、実用化への夢も膨らむ。プロジェクターと投影する対象の位置合わせや、対象物に事前にマーキングしておく必要がないのが強みだ。

例えば工場で映像を使って作業指示を出す場合などに、これまでなら映像を映し出す対象の機械などとプロジェクターの距離や角度を合わせておかなければならなかったが、その必要はなくなる。スマホのような小型の端末にこのプロジェクター機能を搭載すれば、いつでも、どこでも手軽に使えるようになる。

また、書籍の文章を補足するためにページ上に映像を投影したり、地図上にピンを投影して目印にしたりするといった使い方も考えられる。現状は、書籍を印刷物で読むか、タブレット端末を使ってデジタルデータで読むかのどちらかだが、この技術を使えば、紙の上に直接デジタル映像が投影されるようになる。これは紙とデジタルの融合という、次世代の読書体験を私たちにもたらしてくれるはずだ。

視覚表現の  
常識が変わる  
ディスプレイ

# 新型コロナ禍でタッチレス空中 インターフェースの注目度が急上昇

## シースルー構造を有する 全周型インターフェースの開発

宇都宮大学 工学部

山本裕紹 教授

何もない空中に映し出された映像を手で操作する——SF映画に描かれたそんなシーンが身近なものとなりそうだ。宇都宮大学教授の山本裕紹さんは、3次元空間を媒介として情報をやり取りできる環境を構築するという、光応用技術の研究を進めてきた。ACCELでは、空中ディスプレイのシースルー化、それを応用したインターフェースのタッチレス化などの高度化を実現した。

### 映像をダイレクトに操作する

山本さんは、およそ10年前まで特殊なメガネなしで使えるフルカラーの3次元（3D）LEDディスプレイの開発に携わっていた。3D映像が急速に進化した時期である。ちょうどこのころに、3D映像で話題を集め世界興行収入で歴代2位を記録している映画『アバター』が公開され、3D映像が見られるテレビが一般にも販売されるようになった。「私たちが手がけてきた3Dディスプレイの

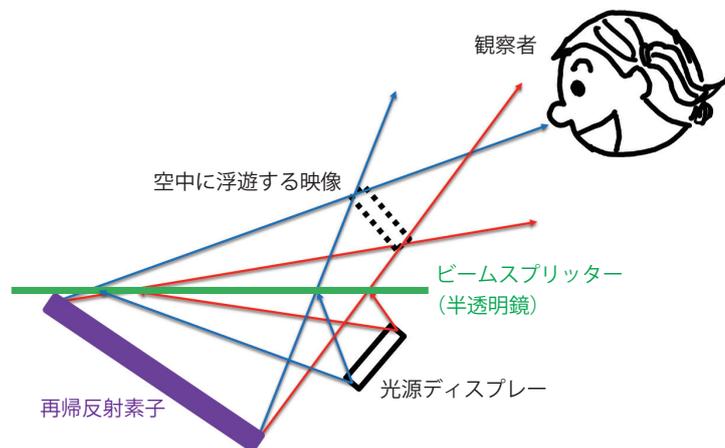
開発は一定の役割を果たした」と考えた山本さんは、その後、人の目に対して違和感なく超高速で映像を書き換えられるLEDディスプレイを開発した。

そして、次の課題は「操作感」だった。例えば映像を指でタッチしてから、その映像が反応するまでにタイムラグがあると、人は操作感が悪いと感じる。自分自身で直接操作している“感じ”が得られないのだ。そこで表示を早く切り替えるだけでなく、人の操作がダイレクトに反映されるディスプレイの開発へと軸足を移した。東京大学の石川グループ研究室と連携して、高速カメラを使って人の動きを撮影して分析。それに対応させてディスプレイを高速で切り替えることによって、あたかも人がダイレクトに映像を操作しているかのようにすることに成功した。

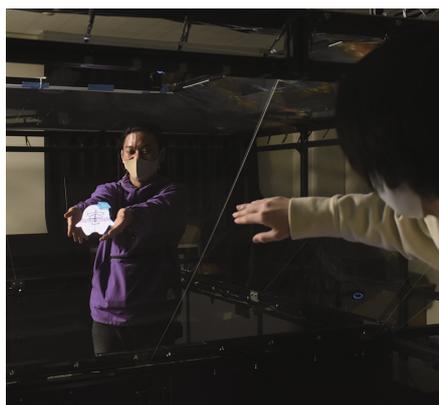
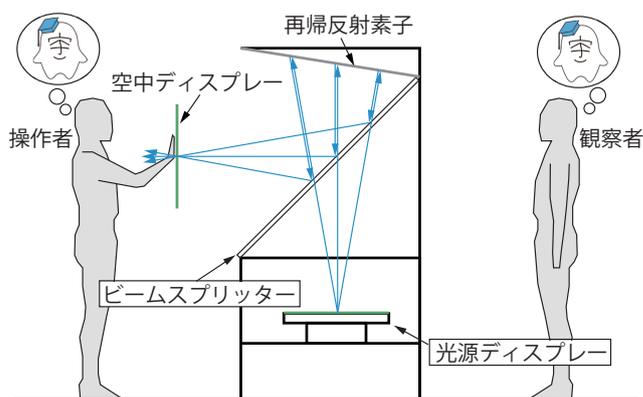
次にターゲットとしたのが、映画に出てくるような空中ディスプレイだった。空中ディスプレイの仕組みは、従



来のディスプレイを光源とし、そこから広い範囲に発散した光を結像素子（再帰反射素子）で集束させて空中に浮遊する映像を形成するというもの。特殊なメガネなしで、どの視点からも同じ位置に映像を観察できる。光源が3Dであれば、空中に3Dの映像が浮かび上がる。東大石川グループ研究室の高速ビジョン技術を組み合わせれ



空中ディスプレイの結像の原理（左）と空中に浮かび上がった映像例（右）



シースルー化した空中ディスプレイの装置構成（上）と操作者、観察者それぞれから見た映像（下）。遮るものがなく、お互いと映像が見える

ば、手や指の位置を検出して、その映像を素手で直接触れて操作しているかのようにもできる。

## より没入感のある 空中ディスプレイへ進化

空中ディスプレイは、例えば、目の前に映像があり右へ一歩移動しても、同じ3次元位置に映像が見える。視点位置が動いても、誰が見ても映像の位置は変わらない。単眼式やステレオ式3Dディスプレイなどとは異なり、違和感のない感覚で映像を見ることができ。しかし、当時の装置は構造上、3Dカメラの補助照明に工夫を要することと映像を見下ろすようにして観察する必要があることから、使用環境が限られるという制約もあった。

そこで、この空中ディスプレイを進化させ、より没入感のあるインターフェース空間にすることがACCELのミッションだった。取り組んだのがインターフェースの「全周型」と「シース

ルー化」だ。四方を空中映像で取り囲むことができ、かつビームスプリッター（半透明鏡）に歪みが生じないように、八杉公基さん（宇都宮大学工学部産学官連携研究員）とともにトライ&エラーを繰り返して、全周型のインターフェースを実現した。一方、シースルー化に際しては、光源（ディスプレイ）と再帰反射素子、収束する映像の位置関係を再構築。下部の光源から出た光がビームスプリッターを透過して、上部に配置した再帰反射素子に反射し、その反射光がビームスプリッターで反射して空中で映像として集束する。この配置によって補助照明を用いる3Dカメラをそのまま用いることができるようになり、多様な形態での実用化が可能となった。

装置を挟んで向き合った2人はお互いが見えるし、空中ディスプレイに表示された映像も、2人は裏表が異なる映像として見える。このシースルー化により「空中ディスプレイを操作する人の前に障害物がなくなったことで、その挙動を

撮影することが容易になり、高速ビジョン技術や赤外線センサーなどの組み合わせが容易となった」と山本さん。画像を操作するタッチレス空中インターフェースへの実用化に大きく前進した。

またいくら有用なものとも認められても、コストや生産性などが見合わなければ普及しにくい。ここにギャップがあると実用化のハードルは高くなるのだ。だが山本さんが採用した再帰反射素子は、リフレクターとして道路標識などに使われているもので、その要件を満たしていた。

## 新型コロナ禍で タッチレス化に注目が集まる

シースルー化がもたらす恩恵は大きい。山本さんが元々イメージしていた活用法は、屋外広告はもちろん、自動車への実装だった。自動車の操作機器は中央にまとまっていて、運転者からやや遠い。かといって近づけようとするれば、視野を遮ったり、ハンドル操作の邪魔になったりする。目の前に浮かび上がるシースルーのインターフェースなら、二つを同時に解決できる。

また交通標識もより安全なものになる。高速道路の出口から進入し、逆走した結果の追突事故がたびたび起こる。これは出口の進入禁止の標識を見逃したことが原因の一つだ。見逃すのは、標識を道路の脇にしか設置できないため、道路の真ん中に進入禁止の標識が出てくるようにすれば、気づかずに侵入するということはなくなるはず。トンネル内では、空気の循環の妨げにならない交通標識としても活用できる。また、空中に出現する映像は、エンターテインメントの分野でもさまざまに活用できるだろう。

そして、現在、新型コロナウイルス感染症の世界的な拡大で、不特定多数が触れる駅の券売機、銀行のATM（現金自動預払機）、エレベーターのボタンなどをタッチレス化できるインターフェースとしても大きな注目が集まっている。

高度化が進む  
高速 3次元  
形状計測

# 動く物体を高速スキャンング

## 超高速携帯型 3次元スキャナーの開発

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

田畑智志 特任助教



物体の3次元形状の情報を取り込む「3次元スキャナー」。従来の装置は大型のものが多く、情報の取得にも時間がかかっていたが、この装置の小型化と高速化の両立に成功したのが東京大学特任助教の田畑智志さんだ。携帯可能な高速3次元スキャナーの実現は、物体の3次元形状の高速な復元や手軽なデジタルアーカイブなどに道を開く。

田畑さんがACCELで開発した小型3次元スキャナーは手のひらに収まるサイズ感で、将来は腕時計型として装着することも想定する。東京大学の石川グループ研究室で開発された高速ビジョンチップを搭載した高速カメラを2台、小型パターンプロジェクターを1台組み込んで試作システムとして完成させた。

### 「形状」と「運動」を測る

ベースとなったのが、高速の3次元形状計測と運動計測の二つの技術だ。

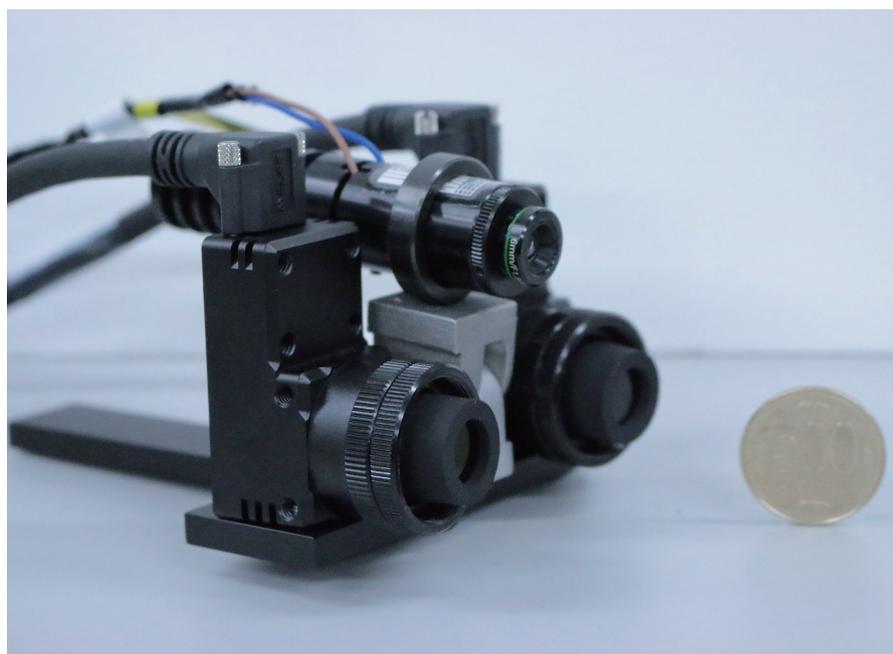
形状計測は、2台のカメラと1台のプロジェクターで構成する、「3視点幾何拘束」に基づく独自の投影パターン認識が要となる。加えて画像間の対応点を検出する際に、階層構造にして段階的に処理する工夫などによって、高速かつ高精度に3次元の点群を取得できるようになった。

さらに、物体の動きを測る3次元運動計測を組み合わせることで、物体のトラッキング（追跡）が可能になる。高速に計測すると、計測点と計測点の間の移動量は小さくなる。このことに着目すると、連続的に計測した場合、プロジェクターの射影面上の同じ場所で計測された点は、物体表面の同一平面上にあると仮定できる。

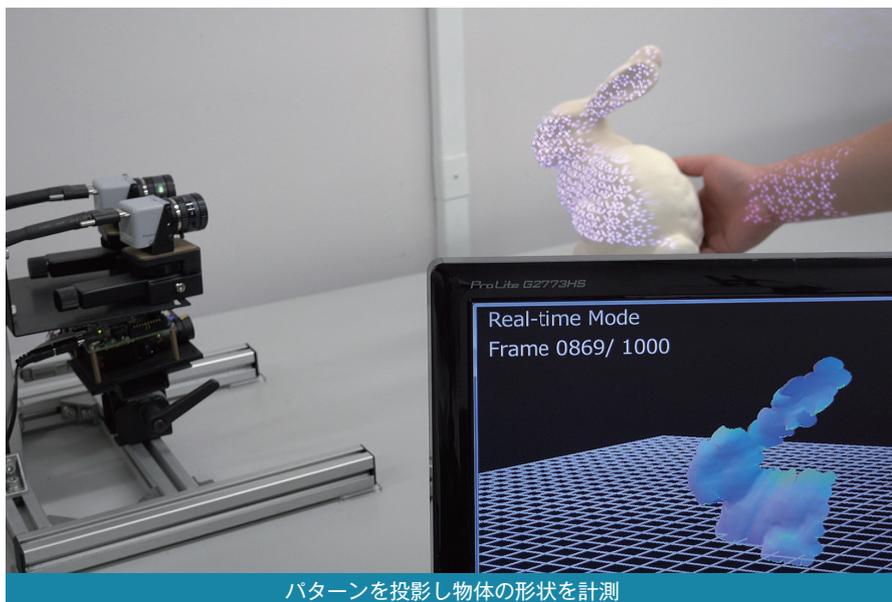
そうすることによって形状間の対応点を効率的に求めることができ、その結果、運動を高速に取得できる。従来は対応点を探す処理時間が長く、高速化に限界があったが、この手法によって毎秒1000コマ（1000fps）のスピードで細かく運動を計測できるようになった。1ミリ秒以下の速さで物体をトラッキングできることになる。

### 毎秒1000コマの計測が可能

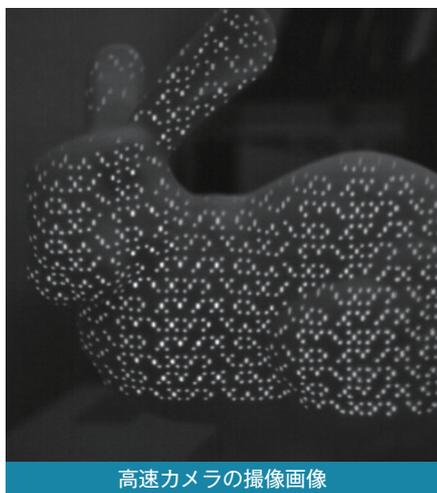
形状計測と運動計測はそれぞれ机上のシステムは完成していたが、ACCELの成果である高速ビジョンチップと小型パターンプロジェクターの採用によって小型化が実現した。人間には見えない赤外光でパターンを投



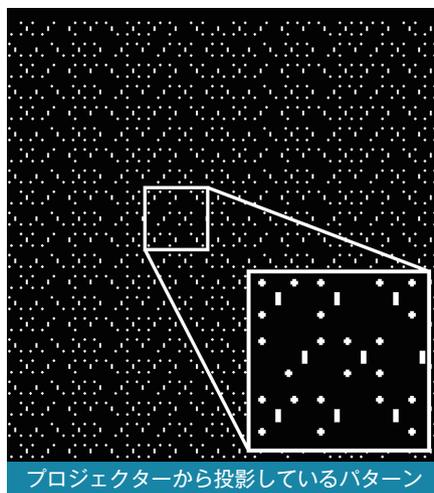
2台のカメラと1台のプロジェクターで構成された超高速携帯型3次元スキャナー



パターンを投影し物体の形状を計測



高速カメラの撮像画像



プロジェクターから投影しているパターン

### 3視点幾何拘束に基づく高速3次元計測

影し、高速カメラで撮像する。形状計測だけでなく、運動計測による形状データを統合させることで、大型の物体でもスキャニングできるようになったことも大きな進展だ。

従来の3次元スキャナーの動作速度は速くても毎秒60コマ程度。それを精度は落とさずに毎秒1000コマまで高速化し、さらに小型にもできた。「ここまで速くなれば、物体の動きをリアルタイムに計測できるって言いたいだろう。人間が装置を手に持ち、計測対象の物体の周囲に沿って自然に動かすだけで、物体の全形を簡単にスキャニングできる」と田畑さんはアピールする。

加えて、田畑さんは別のアプローチ

による3次元形状計測にも取り組んでいる。動く物体の形状をリアルタイムかつ精度良く、高解像度に計測する既存の「位相シフト法」に、正弦波の周期ごとに投影パターンを並べ替える順序構造を導入した新たな計測手法を考案した。これによって、従来よりも少ない枚数のパターンで計測ができるようになり、高速プロジェクターと組み合わせることで、実環境で想定されるような高速な動きでも高い精度で計測できるようになった。

このほか、物体を高速にトラッキングしながら投影するシステムの開発などにも携わっている。高速ビジョンと高速プロジェクターに、高速の応答性を持つ液体レンズを使った焦点距離の

補正技術を組み合わせたシステムだ。従来は奥行方向にいくと投影像がボケてしまう課題があったが、このシステムは奥行方向にダイナミックに動く物体でも、焦点の合った像を追従しながら投影できる。

## 高速化と小型化で 応用が花開く

「高速化」は、これまでとはまったく異なる応用を生み出す。例えば自動車やロボット関連で言えば、毎秒30コマのビデオレートの処理だと取得したデータのフィードバックが間に合わないだけでなく、そもそも計測自体が難しい。工場などでも、その速さなら検査のたびにラインを止めなくてはならないが、高速で動く物体を計測できるようになれば、こうした問題は一気に解決する。

さらにそこに「小型化」が加われば、使い勝手が格段に良くなることは言うまでもないだろう。ロボットの“目”として搭載すれば、外界のあらゆるものを人間の知覚以上の精度で計測でき、ロボットの認識能力が飛躍的に高まる。また、仮想現実（VR）や拡張現実（AR）で作った3次元のイメージ像や、遠隔地にある物体を瞬時に取り込んだデータなどを別の場所に投影するといった使い方も可能かもしれない。「ロボットと人間が協調する動作などに応用していきたい」と田畑さんは今後を見据える。

また、医療への応用も期待できそうだ。医療分野では3次元計測はまだあまり使われていない。臓器の動きを非接触で計測したり、身体表面に映像を投影して遠隔手術に活用したりといったシーンが考えられそうだ。

将来、現在のカメラのように普及させることができれば、写真撮影と同じように3次元プリントがいつでもどこでも可能になるのだろうか。3次元スキャナーは、そんな私たちの日常をガラリと変える可能性を秘めている。

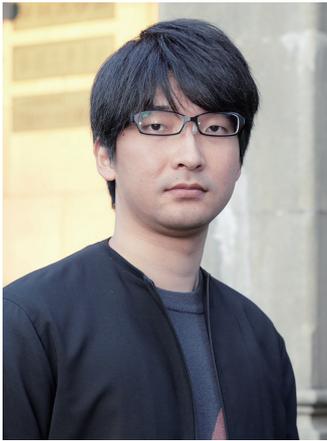
高度化が進む  
高速 3次元  
形状計測

# 物体の「質感」を取得して操る

## 人の知覚を超えた高速情報システムの構築

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

宮下令央 特任講師



人間の目に映るものはすべて真実なのだろうか——。動くモノに瞬時に映像を投射することで、そのモノの材質があたかも変化したかのように見せることができる。東京大学特任講師の宮下令央さんは、こうしたモノの色や素材、光沢感といった「質感」を自在に操る技術を開発した。

「コンピューターを使って、人間が気づかない速さでモノの見た目を制御すれば、人間にとってはそれが“真実”になる。視覚情報を制御することで、そんな新しい世界を構築したい」と宮下さんは語る。人間の知覚を超えた高速の情報システムがあれば、世界を一瞬で塗り替えることもできるのだ。

### 視覚情報を分解して取得

人間が視覚から得る情報は、物体の「形状」と「質感」、それに「照明」などの環境条件が混ざり合ったものだ。宮下さんはACCELで、通常は統合さ

れているこれらの要素を分解して取得する研究に取り組んだ。最終的に質感を高速に計測するために、最初に試みたのが物体の形状の把握である。

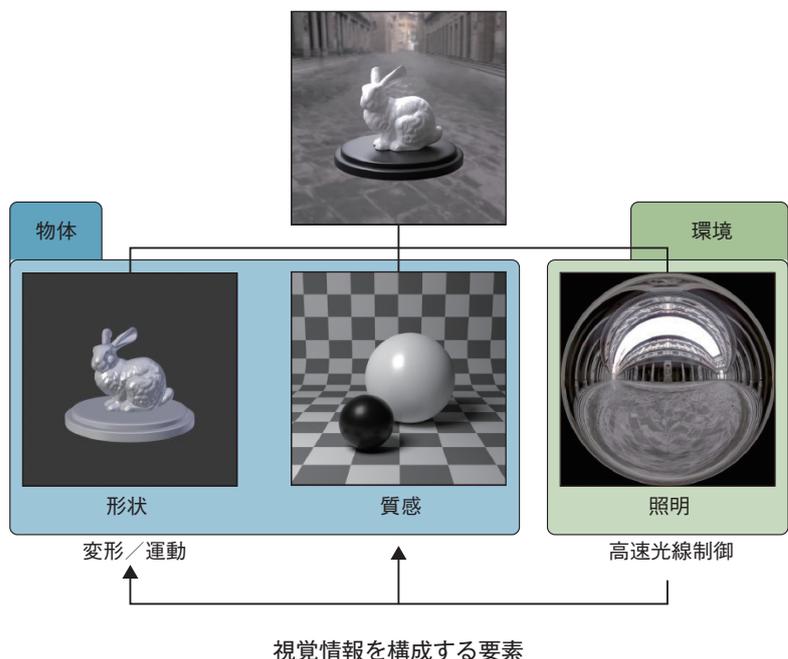
東京大学の石川グループ研究室で開発した高速の小型3次元スキャナを使って、まず、カメラから物体上の各点までの距離を計測する。この距離の計測結果から物体の大まかな形状を計測することが可能だが、それだけでは表面の様子まではわからない。そこで考案したのが、物体表面の傾きを示す「法線」を計測して利用する手法だ。

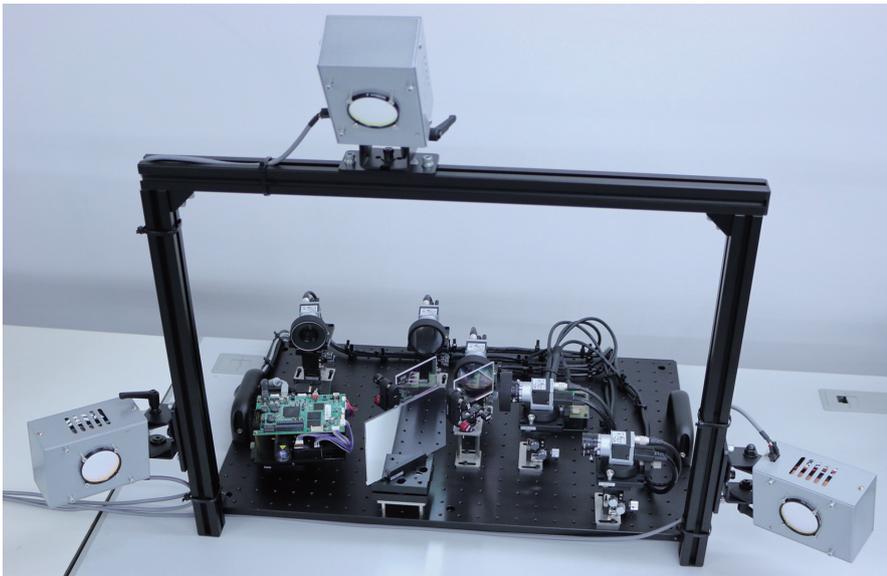
宮下さんは3種類の近赤外光を使い、従来は静止画として計測することが多かった法線を毎秒750コマ(750fps)の速さで計測することに成功した。法線を取得できると、物体表

面の細かな凹凸形状だけでなく、新たに開発した法線の特徴量を使って物体の回転などの3次元的な運動情報まで得ることができる。

この距離の計測と法線の計測結果を組み合わせれば、物体の形状を詳細に復元できる上、その運動の軌跡も正確に記録できる。実験では、ウサギの置物の彫り模様まで緻密に計測できている。

これに加えて、分光反射率と輻射熱<sup>ふくしゃ</sup>の時間変化から質感を推定する技術も開発した。これまでは大型のシステムで長時間かけて計測していたが、光によって物体に熱を与え、物体表面の温度変化から質感を素早く推定できるようにした。わかりやすく単純化して言えば、表面の温度がすぐに下がれば表





距離と法線の同時計測システム。計測結果を組み合わせて物体の形状を詳細に復元し、その運動の軌跡も正確に記録する



高速情報システムで再現したミダス王の逸話

面積が大きい、すなわち表面がザラザラした状態。逆に下がりにくい場合は、表面がツルツルしているといった具合だ。

さらに物体に固有の分光反射率から、その材質がプラスチックであるか、木であるかといった特定が可能になる。物体表面に光を当てただけでよいから、システムの小型化かつ高速な計測が実現した。

## 統合して実世界へ投映

このようにして要素を分割して計測

できたら、次はいよいよ統合し編集することで実世界に映し出す。宮下さんは、運動や変形を伴う物体にプロジェクターでコンピューターグラフィックス（CG）映像を投映する「ダイナミックプロジェクションマッピング」によって、色や光沢感などの質感を自在に変えられる投影システムを開発した。

このシステムは、従来のように投映先の対象に事前にマーカーを貼付したり、形状のモデルを仮定したりといった準備が不要となる。

「マーカーの貼付が難しい動物や食

べ物、またモデル化が難しい水や粘土、魚の群れといった動く対象にもピタリと映像を投映できる」（宮下さん）という。

実際に製作した、動いている手に銅像のような光沢感をつけたり、流れる液体に色をつけたりするシステムのデモンストレーションは、国際学会で大きな反響を呼んだ。写真は“触れたモノをすべて黄金に変える”ギリシャ神話のミダス王の逸話を再現したものだ。高速の法線計測と、法線から高速に映像を生成する高度なアルゴリズムによって具現化している。

プロジェクターの前に配置しさえすれば、どんなモノでも瞬時に姿を変えられる。ファッションショーや、サーカスなどのエンターテインメント分野、映像メディア、試作品のレビューなど、その応用の可能性は尽きない。

## CGで忠実に再現も

宮下さんはCGクリエイターの顔も併せ持ち、これまで過去の遺跡をCGで再現するといった案件を手がけてきた。実世界に映し出すだけでなく、現実の対象をCGとしてまるごと画面上に取り込むことで表現の幅も広がるだろう。

産業応用としては、工場などでの製品検査に使える。製品1個1個に対して、傷やムラがないか、表面の質感は設計通りか——。現在は簡易的に行っているこうしたチェックをより高速かつ厳密にできるようになる。完成した製品検査だけでなく、設計工程における試作にも応用できる。

「人間の目に映る情報を完全掌握したい」というのが宮下さんの目指すステージ。ひとたび情報を取得できれば、形や質感を変えたり、照明を変えたりして世界をいかようにもデザインできる。視覚を操作することで、人間がかつて見たことのない景色も味わえるかもしれない。

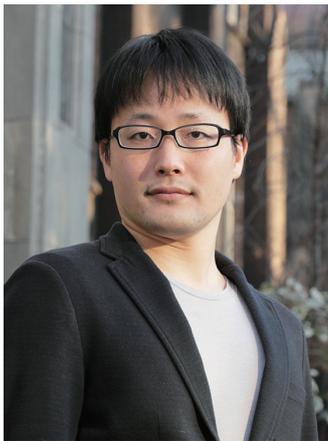
応用分野が広がる  
高速画像処理

# トンネル内などのインフラ点検を 走行しながら高精度・低コストで実施

## 高速画像処理を用いた浮き・剥離検査システム

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

早川智彦 特任准教授



た小型のシステムで、通常の巡回車両に搭載して使えるのが特徴だ。

カメラのレンズの正面に置いたミラーをモーターによって時計回りおよび反時計回りで交互に回転運動をさせる。このミラーを車両の移動速度に合わせて反対方向に動かすことで車両の走行速度を相殺し、走行しながら同じ場所を連続的に撮影できる。実際にトンネル内を時速 100 キロメートルで

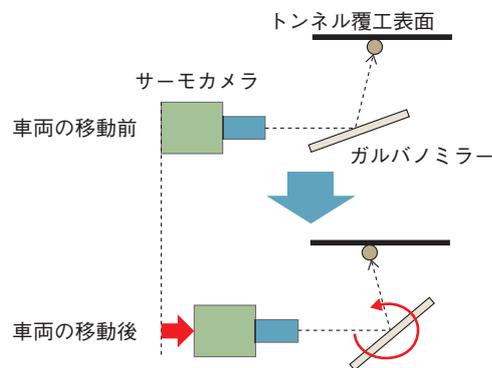
走りながら、トンネル覆工面にできた幅 0.2 ミリメートルまでの細かいひび割れを撮影できることを確認した。

撮像部を回転させることで、トンネル内なら 50 回程度往復すれば天井部をくまなく撮影できる。一枚ずつ静止画を撮影する場合に比べても精度は遜色ないという。通常の巡回のついでに点検できるため低コストで人手も要らない。従来も走行しながら撮影する手

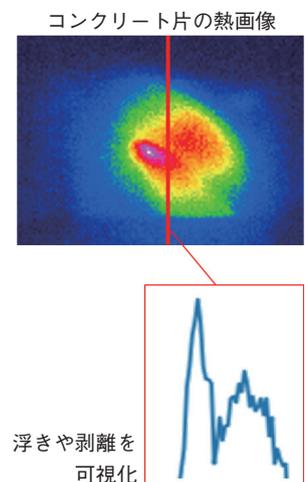
日本の高速道路の老朽化が指摘されて久しい。高速道路の総延長は約 9000 キロメートルと地球 1 周の約 4 分の 1 の長さで、そのうち約 40% は供用後 40 年以上が経過しておりメンテナンスが急務だ。現状は 5 年に 1 回、道路を規制して主に人が目視や打音などによる詳細な点検を行っているが、平時から継続的にモニタリング(監視)することでメンテナンスをより効率化できる。

### ひび割れや浮き、剥離を検出

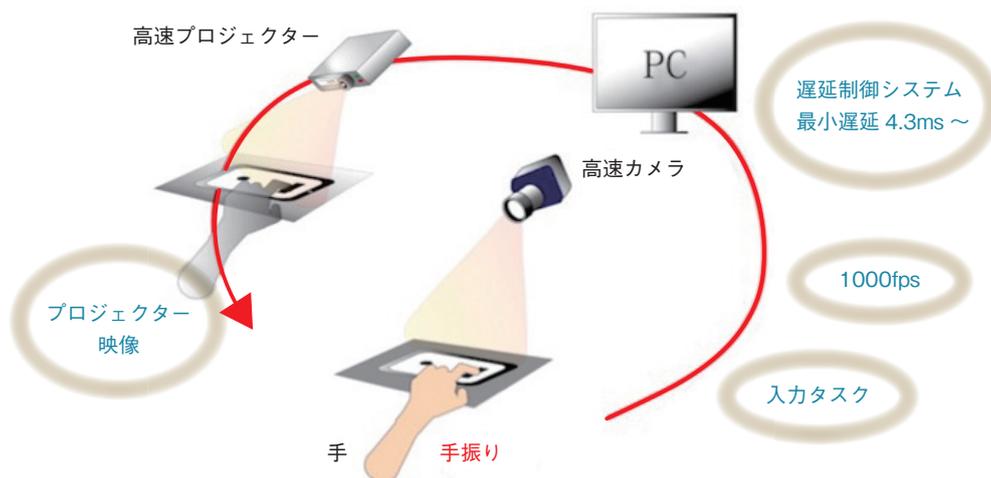
東京大学特任准教授の早川智彦さんは、高速道路を走行しながらひび割れなどの劣化箇所を検出する、高速画像処理を用いた道路点検システムを開発した。中日本高速道路(NEXCO 中日本)との共同研究で実用化を急ぐ。東京大学の石川グループ研究室で開発した高速カメラとガルバノミラーを使っ



走行しながら静止時と遜色ない画像を撮影できるモーションブラー補償の原理



高速サーモカメラを使った浮きや剥離の検出システム



映像遅延の制御システム。手の動作が映像出力されるまで最短 4.3 ミリ秒を達成し、以降任意の遅延時間を加えることができる

法はあったが、専用車両が必要だったり、精度をカバーするために強い照明を当てることでほかの走行車両の邪魔になったりする問題があった。

さらに ACCEL では可視光カメラを高速サーモカメラに置き換えることで、「可視画像では発見が難しいコンクリート構造物の浮きや剝離も同時に検出できるようにした」（早川さん）。そのほか、精度向上のために撮影画角を2倍に広げる技術なども開発している。引き続き実証実験を行うとともに、今後は実用化に向けてひび割れなどを自動で検出するソフトウェアの開発も目指す。早川さんは「高速道路だけでなく、鉄道や飛行機、工場など動きを伴う点検の現場にも応用できる」と考えている。

## 映像遅延の許容限界を明らかにする

早川さんは認知科学にも興味を持ち、人の特性を測ることで「人間とは何か」を明らかにしようとしてきた。産業応用に向けては機械の性能指標を押さえた上で、最終的に「人間と機械の性能を融合し相互作用を生み出す」ことを狙いとする。人間の知覚には限界があるが、それを越えた知覚情報を適切に与えれば、人間の行動能力をさらに高められるという。

そのためには人間の認識行動様式を

把握し、能動的なインタラクションを誘発する適切なインターフェースを設計する必要がある。こうした技術を「アクティブ・パーセプション（活動的な知覚）」と呼んでおり、早川さんは東大石川グループ研究室で研究リーダーを担い、ACCEL でその研究にも取り組んだ。

例えば、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）などの仮想現実（VR）映像提示デバイスの利用時の影響などを調査している。こうしたデバイスは入出力時の処理によって映像の提示にある程度の遅れが生じるが、それによって視覚情報と身体感覚に時間的な不整合が起こる。その結果、めまいや吐き気といった“VR 酔い”と呼ばれる症状だけではなく、操作性やユーザーのパフォーマンスの低下を引き起こす。

早川さんはこの映像遅延の影響について、従来は十分に研究されてこなかった没入感の高い環境を構築して調査した。高速カメラと高速プロジェクター、ミラーを使ったシステムを構築し、心理物理学実験を行った結果、撮像から投影までの遅延時間が 24.3 ミリ秒を超えると、ユーザーのパフォーマンスが徐々に低下し始めることが判明している。

これは規定された経路をたどる 1 次元の動作をタスクとしており、階段

状の経路に沿って指を動かす 2 次元動作のタスクでは 64.3 ミリ秒が遅延の許容限界だった。今後、モノをつかむといった人間の自然な動きである 3 次元のタスクでも実験する。早川さんは「人間の作業パフォーマンスを高く保つ VR デバイスの設計指針などにつながる」とその意義を語る。

## 新しい交通標識の可能性

このほか、人間が見る方向や移動速度によって異なるコンテンツを表示するディスプレイなども開発した。そこではある速度で特定の画像が見えるように、1 ミリ秒ごとに映像を切り替えている。

例えば、道路脇に置いたディスプレイに、進行方向の左側から見た場合は「加速注意」、右側から見た場合は「逆走中！」といった異なる情報を提示することが可能だ。複数のユーザーに同時にコンテンツを提供できるため、エンターテインメント分野や広告、スポーツなどのほか、こうした車のスピード違反通知や、渋滞を避けるためのスピード加速指示といった「新しい交通標識」としての利用が見込めるといえる。

機械とのインタラクションによって人間の知覚の先にある可能性を見いだす——。早川さんは、そうして新たな応用を模索している。

応用分野が広がる  
高速画像処理

# 焦点が異なる複数の画像を同時に撮影

## 露光タイミング制御による任意フォーカス技術

群馬大学 大学院理工学府

奥寛雅 教授

一般の人が高速で動く対象を通常のカメラを使って撮影すると、画が流れてぼやけたり、画角から外れてしまう。かといって遠目から撮影すれば、豆粒のような小さくてわかりづらい画になってしまう。その大きな要因は、対象の動く速度がその大きさに比べて高速であるためだ。

群馬大学大学院理工学府教授の奥寛雅さんは、そのような通常では捉えることが難しい対象や現象を、光学系や照明系、処理系などをうまくコントロールすることで人間にわかりやすい形で提示する「ダイナミックイメージコントロール (DIC)」の研究を進めている。

### 映像利用の新たな展開

DICの活用分野は、医療・バイオ

や映像・メディアをはじめ、スポーツ支援、FA（ファクトリーオートメーション）、ヒューマンインターフェースなどと幅広い。

例えば、サッカードミラー（高速視線制御ユニット）と毎秒1000コマ（1000fps）の高速画像処理により、卓球のラリー中の球を追従してあたかも画面中央に止まっているかのように見せたり、動き回る球にプロジェクションマッピングにより映像を投影してより効果的な演出をするといったことが可能になる。奥さんは、「将来的には回転数などをリアルタイムで詳細に観察して、アスリートのトレーニングをサポートする応用も期待できる」と話す。

また、従来の手法では限界があった



3次元計測の高速化を実現する「構造化ライトフィールドプロジェクター」も手がけている。従来は、対象物までの距離を測るには三角測量の原理を用いた測定法などが中心であったが、こ

高速光学素子／ユニット

OFF 1000 fps ON 8000 fps — 1000 fps  
Focus Stacking

高速液体レンズ（ダイナモフレズ）

VR/AR/MR

食べられる再帰性反射材と料理へのプロジェクションマッピング

High-speed vision  
Projector  
2-axis rotational mirrors

動的プロジェクションマッピング（ルミベン）

ライフサイエンス・バイオ

高速視線制御ユニット（サッカードミラー）

高速3次元計測

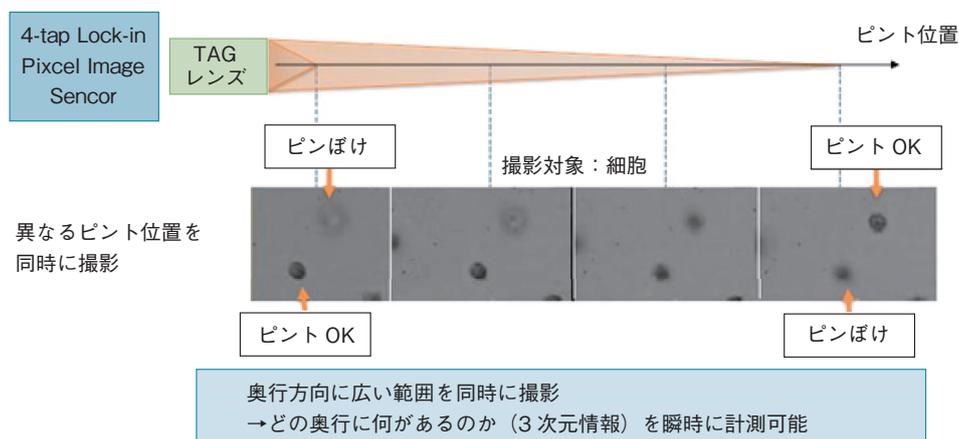
構造化ライトフィールド

映像撮影・計測応用

1ms Auto Pan-Tilt  
1ms High-Speed Vision  
Target Position Recognition

1ms オートパンチルトとスポーツ支援への応用

ダイナミックイメージコントロール (DIC) とその応用



奥行方向に広範囲の画像を同時に計測可能な高速3次元化モジュール

れだと計算量が多くなってしまい高速での算出には限界があった。開発した技術は、プロジェクターから対象物にパターンを投影し、距離が変わると映し出されるパターンの形が変化することを利用して、対象物までの距離を高速かつ高精度に推定する。

バイオ・医療分野では食べられる再帰性反射材を開発。再帰性反射材は、道路標識や自転車の反射板として採用されている光学素子で、画像処理用のマーカーとしても利用されている。食品（寒天や飴など）から再帰性反射材を作れば、ホットケーキなどの料理に映像を投影してアニメーションを楽しめるなど新たな演出が可能になる。また、人の消化管内壁に設置して高精度な検査や診断を無害で安全に実現できる技術としても期待される。

## 高速焦点位置制御と複数焦点画像の同時計測

ACCELでは、DICの技術をベースにして動き回る微小対象の3次元情報を高速に計測できる光学顕微鏡用カメラモジュールを考案した。「浮遊する細胞や心臓の拍動のような高速な現象を観察する場合は、動きが止まって見えるくらい短時間で焦点位置を変更して高速に撮影する必要があるが、一般に利用されている光学顕微鏡では、このような高速な焦点位置制御を実現する原理がなかった」と奥さん。そこ

で「TAGレンズ」と呼ばれる約70キロヘルツ（1秒に7万回）という高速で焦点を変更できる共振型の液体可変焦点レンズを採用。このTAGレンズは、内部の液体中に超音波を発生させると粗密波ができて密度差が分布し、焦点距離が変化し続ける。このTAGレンズに同期して多重露光ができる特殊なカメラを組み合わせて、数マイクロ秒（マイクロは100万分の1）で焦点位置を変更できる高速3次元カメラモジュールが完成。遊泳する細胞（クラミドモナス）の位置を1秒間に1000回、3次元的に計測することに成功した。

さらに、奥さんは静岡大学の研究グループと共同で焦点が異なる複数の画像を同時に撮影できる技術の開発も手がけた。「Simulfocus Imaging」と名付けられたこの技術は、TAGレンズと、4つの画像格納領域を持ちそれぞれにナノ秒（ナノは10億分の1）の精度で独立して多重露光ができる撮像素子を組み合わせることで、1台のカメラで同時に4カ所の異なる場所にピントが合った画像を撮影できる。高速に振動する焦点位置が撮影したい場所にきた時に、100ナノ秒程度の非常に短い時間だけシャッターを開く。この操作を画像を格納する領域ごとに異なる焦点の場所で行うことで、焦点の異なる画像を実質的に同時に取り込める。さらに多重露光より取り込む光を

増やして、より明るい画像を取得できる。奥さんは「オートフォーカス機構と異なり待ち時間がないため高速で、かつ機械的な駆動部がないためカメラの長寿命化が期待できる」と利点を強調する。

## 幅広い分野で応用が期待

Simulfocus Imagingは幅広い用途が見込まれる。まず、工場などのFA（ファクトリーオートメーション）分野における画像検査への適応だ。例えば、コンベヤーラインを流れる複数の高さの異なる部品を検査する場合でも、この技術を使えば1台のカメラで同時に複数部品の高速な3次元計測が可能になり、検査の効率化につながる。従来であれば複数のピントが異なるカメラか、オートフォーカス機能が付いたカメラを用意する必要があった。

このほか、バイオ・医療分野への応用も期待できる。顕微鏡下にある対象に対する高速な焦点調節や高速な3次元計測が可能だ。内視鏡手術や腹腔鏡手術と組み合わせれば、拍動している患部を拘束することなく、複数の箇所に焦点が合った画像を観察しながら手術を行えるため、手術の時間短縮や成功率の向上に寄与できる。また、術者が遠隔地の患者をリアルタイムに直接手術する遠隔手術をサポートできる技術としても注目されていきそうである。

応用分野が広がる  
高速画像処理

# 負担の少ない眼底カメラ、 リモート診断のツールとしても期待

## 自撮りできる高速ビジョン応用小型眼底カメラ

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

太田淳 教授



自分自身で眼底画像を撮影し、その画像をもとにリモート診断による生活習慣病の経過観察ができるようになるかもしれない。新型コロナウイルスと共存していかなければならないこの時代。自宅にしながら診断を受けられるというのは、時代を先読みしたかのような研究成果である。

イメージセンサーによる人工視覚の研究を手がけてきた奈良先端科学技術大学院大学教授の太田淳さんは、竹原浩成さん（奈良先端科学技術大学院大学特任助教）や角博文さん（東京大学情報基盤センター特任研究員）とともに今回、自撮りできる小型眼底カメラの研究開発に取り組み、実用化へ向けて大きな一歩を踏み出した。

### 従来の眼底の撮影は 目への刺激が強い

太田さんは、元々は生体に埋め込むマイクロチップの研究を専門としてき

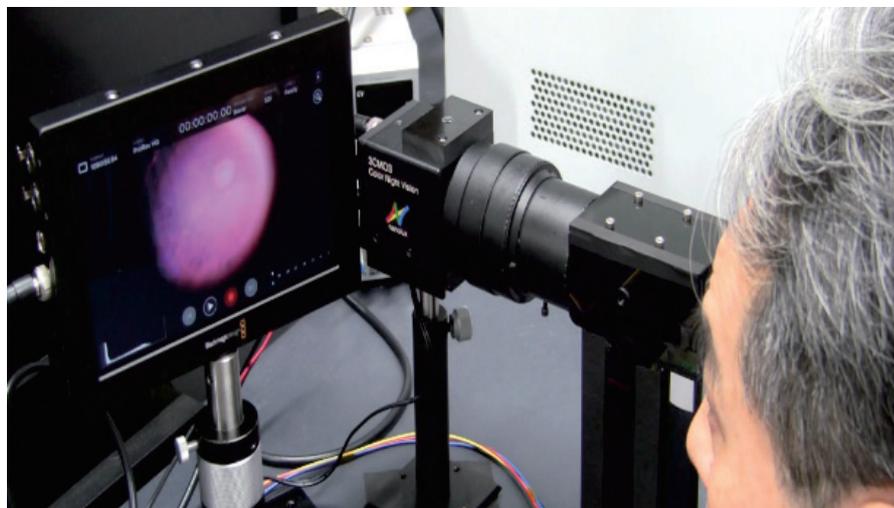
た。目に直接、網膜刺激チップを埋め込んで光覚を再建する人工視覚や、マウスの脳内に埋め込んで脳機能イメージングを行うセンサーデバイスなどの研究に取り組んできた。眼底カメラは専門ではないが、「高速ビジョン技術を組み合わせることで、これまで制約が多かった眼底の撮影がもっと手軽にできるようになり、さまざまな展開が期待できる」と太田さんは、この研究のメリットを話す。

というのも人間の眼球は、本来なら強い刺激は与えたくない、とても敏感で繊細な器官。それでも眼底画像を撮影するのは、無数の毛細血管が入り組んでおり、その血管を観察することでさまざまな病気の兆候を知ることができるためだ。緑内障といった目の直接的な疾患はもちろん、動脈硬化、糖尿

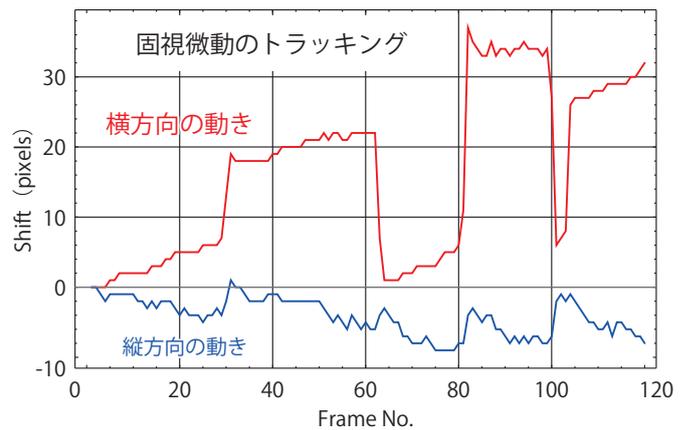
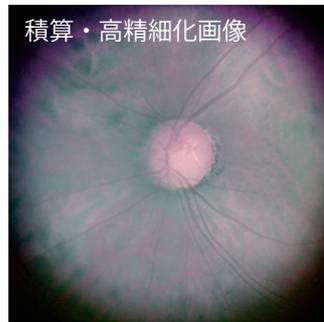
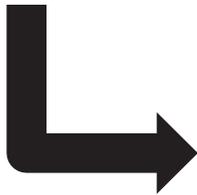
病、高血圧なども眼底の血管から兆候を見つけられる。これらを早期に発見できれば、治療、改善にそれだけ早く取り組める。糖尿病が原因で視力が悪化する場合があるが、日々の経過観察により、適切な治療時期・方法の見極めが容易になる。

「これだけの血管が一度に観察できるところはほかにはない。眼球以外で診断しようとしたら、身体を切るしかない」と竹原さんは話す。眼底カメラは、身体への負担を大きく減らせる有効なツールなのだ。

しかし、従来の眼底カメラによる撮影は、クリアしなければならない課題がいくつもあった。まず眼球は常に微動していること。それを撮影するためには、微動してもぶれないところまでシャッタースピードを上げなければな



手軽に自撮りできる小型眼底カメラシステム。赤外線撮影でまぶしくないため、目への負担は少ない



高速撮影した画像をトラッキング。さらに散乱光除去処理して、高精細眼底画像にする

らない。シャッタースピードを上げ、短時間で露光するためには強い光源が必要になる。これがもう一つの壁である。周囲が明るいと、眼球の前面にある瞳孔が閉じて眼底が見えにくくなるため、周囲を暗くしなければならない。そこで通常は強烈なフラッシュを一瞬当てて、撮影するという方法がとられる。目には強烈な刺激となる。

一方、瞳孔を開きっぱなしにする薬品を投与する方法もあるが、薬品の効き目が切れるまで外出などを控えなければならない。どちらにしても身体に負担となり、デメリットであることに変わりはない。

## 赤外線撮影とカラー化

通常の眼底カメラでは光軸調整などには目に見えない近赤外光を用いているが、近赤外光だけではカラー画像を得ることができないためにフラッシュ光を用いてカラーの眼底画像を得ている。一方、太田さんは、赤外線カメラで眼底画像を得るというアプローチを採用した。眼球は1秒間におよそ100回振動している。ということは100分の1秒のシャッタースピードで撮影すれば、ほぼ静止した画像が撮れると

いうことになる。現状、このレベルをクリアしている。

ただし、暗室内における赤外線カメラによる撮影のため、画像が荒くなってしまいう問題が出てくる。診察に使用できるレベルまで処理してクリアな画像にしなければならない。ここでトラッキング技術が生かされた。1画像ごとにずれた分だけ修正して重ね合わせる。これを繰り返すことでノイズは除去される。さらに、光散乱による画像のボケを取り除く画像処理技術によって、明瞭な眼底画像の取得に成功した。

そして、ACCELでは近赤外光を用いた眼底画像のカラー化に成功した。可視光の赤 (R)、緑 (G)、青 (B) は、近赤外光の3つの異なる波長 (IR1、IR2、IR3) と相関があり、その相関を利用してR、G、Bを割り当てて重ね合わせれば、モノクロ画像からカラー画像を再現できる。ただし、例えば肌色は再現しやすいが、逆に再現しにくい色もあるという。完全なカラー画像の再現とまではいかないが、それでも診断には十分なレベルをクリアしているという。

「赤外線カメラで血管が見えるのか

という疑問を持つ人もいましたが、症状によっては近赤外線の方が見やすいものもあった」と太田さんは、この研究の手応えを強調する。

## 医師のリモート診断が可能に

太田さんは、「今後はさらに小型なカメラモジュールにして、もっと手軽に使えるレベルにしていきたい。そのためには1つのイメージセンサーで3波長の近赤外画像を同時に取得することが必要で、作製にあたっては微細なモザイク状の誘電体積層膜フィルターがキーテクノロジーとなる」と話す。

この技術が実用化されると、さまざまな生活習慣病の診断を、リモートによって直接医師から受けられるようになる。さらにスマートフォンに搭載すれば、自分で簡単に撮影し、その画像を送信して、医師はこれまでの眼底画像と変わらない精度の画像を見ながら診断やアドバイスができる。「将来は体温計や血圧計のような、手軽なセルフヘルスケア機器となることが期待できる」と太田さん。自宅にいながらにしてリモート診断を受けられるツールとして期待は大きい。

自動運転に貢献する  
高速画像処理

# 高精度な自動運転をサポート

## 高速ビジョンを用いた車載画像処理システム

広島大学 大学院先進理工系科学研究科

妹尾拓 准教授

「高速ビジョンカメラで認識し、計算して、ロボットを動かす——このループをいかに早く行うかというのが私の研究フィールドです」と話すのは広島大学准教授の妹尾拓さん。高速ビジョンによるセンシングや多指ハンドアーム、二足走行ロボットの開発など、人の能力をはるかに上回る能力を持つロボティクス技術の研究を手がけてきた。

その妹尾さんがACCELで取り組んだのは、高速ビジョンを自動車の運転サポートや自動運転へ活用する研究である。

自動車の自動運転における環境認識には、クリアすべき3つの課題がある。①自己認識、②信号機認識、③他車両認識である。順を追って説明していこう。

### 路面テクスチャから 走行軌跡を推定

まず自己認識。言い換えれば、「自

車両がどこをどのように走ってきたのか」「その結果、現在どこを走っているのか」を正確に認識することである。これができなければ、自動運転で道路に沿って走行したり、車線をはみ出すことなく走行することはできない。当然だが目的地へもたどり着けない。

そこで高速ビジョンカメラで道路表面を撮影し、それを解析することで走行軌跡の推定を行うシステムを構築した。道路のアスファルトには、小さな凹凸（路面テクスチャー）がある。それを毎秒500コマ（500fps）という高速で撮影し、その画像を分析することで、「凹凸がどれだけ、どの方向へ動いたか」を認識する。車両が時速100キロメートルで走行していても、500fpsで撮影すれば0.0554メートル移動するごとに画像を得ることができ、車両が動いた距離と方向が詳細にわかる。

凹凸が前方から後方へ真っすぐに動いていれば、車両は直進していることになるし、右前方から左後方へ動いていれば、右折していることになる。シャッタースピードと時間から、走行した距離も計算できる。また、車両は走行中に左右に揺れるが、それに補正をかけて、より正確に軌跡と距離を割り出せるようになっている。この技術は、東京大学生産技術研究所助教の平野正浩さんとともに開発している。

位置情報を知る技術としてはGPS（全地球測位システム）が普及してい



る。しかし、GPSだけではどうしても1~2メートル程度の誤差が出る。今回の高速ビジョンを使用したシステムは、GPSより正確に移動の軌跡がわかるが、一方で蓄積誤差が生じる問題がある。画像1枚ごとの誤差は小さくても、長距離を走行すると大きな誤差になってしまうのだ。そこで妹尾さんは、「両方を組み合わせることで長所を高め、短所を消し合う運用をイメージしている」と話す。

### 信号機と他車両の認識

人の目や通常のCCDカメラ（30ヘルツ）では認識できないが、実はLED信号機は高速で点滅している。この点滅パターンを高速ビジョンカメラで捉えて信号機を検出するとともに、機械学習による色識別器を用いて信号機の赤、青、黄を認識する。しかし街中には、信号以外にも、電光掲示板タイプの案内標識や街灯などの点滅



車載画像処理システム



### 自動車の自動運転における3つの環境認識

しているLED光源がある。そこで、例えば「道路上に設置されているもので、高さは何メートル以上」といったフィルターをかけて、信号以外を除去するというアルゴリズムを組み合わせて認識精度を高めている。

信号機検出の従来技術としては、色や形状、光源の強さといったもので検出する方法がある。しかし、カメラの画素数には限度があるので遠くの信号機は検知しづらくなる。しかし高速ビジョンカメラで捉える方式ならば、認識しているのは点滅だけなので距離は問わない。このため「目の前の信号は青だが、その次の信号は赤だからアクセルを緩めながらゆっくり減速する」といった自動運転が可能になる。こうした運転は、乗り心地に直結する重要な要素だ。ただし、強い逆光のときは点滅を見逃すという弱点がある。そこで妹尾さんは、「信号などのインフラは、そんなに頻繁に変わるものではないので、地図情報と連動することで信

頼性を高めることができるだろう」と話す。

また、自動運転において自車両と前方を走る車両との位置関係を把握することは欠かせない機能の一つ。妹尾さんは前方の車両だけでなく、その前を走行する車両（重畳車）まで認識するシステムを開発した。人工知能（AI）が前方を走行する車両をバウンディングボックス（矩形）として認識し、車両が重なって一部しか見えなくなっても、混乱することなくトラッキングし続けることができる。最近では、重畳車の輪郭をリアルタイムに抽出する手法も開発している。

ミリ波レーダーという従来技術では車両の挙動を大まかには把握できるが、認識精度に課題があった。今回の高速ビジョンを使用したシステムは安定したトラッキングが可能で、渋滞時や前方車両が車線変更する際に、スムーズな発進や減速、停止をサポートできる技術として期待される。

### 安全で快適な自動車社会へ

一般乗用車における条件付き運転自動化（レベル3）や特定サービスにおける高度運転自動化（レベル4）が実用化を迎えようとしている。今回のACCELの成果によって、高速ビジョンも自動車運転にとって有用なシステムであることが証明された。

妹尾さんは、「自動車の自動運転は万が一にも事故につながってはいけなもので、それだけ求められるものは厳しくなる。しかも技術コストも考えなければならない。いくら性能が高くても、コストがかかれば普及は難しい。そのためには他の技術と組み合わせ、良いところを出し合い、欠点を補いながら実用化を目指すのが現実的なアプローチになる」と話す。

より安全で快適な自動車社会の実現へ——高速ビジョンを利用したシステムは、従来技術と連動し、その一翼を担う技術になる。

ヒューマン  
インターフェースの  
新展開

# 高速広域計測投影システムにより スポーツ支援や生物の健康管理が可能に

## 光学系を駆使した 広域かつ高速に動くモノの画像計測

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門

末石智大 特任講師



動く球体へのプロジェクションマッピングや泳ぐメダカの追従撮影——。東京大学特任講師の末石智大さんは、光学的な装置を駆使し、動いているモノを画像によって計測する研究を手がけている。光学系などを工夫したビジョン（視覚）を用いてダイナミックな対象を計測する「ダイナミックビジョンシステム」の研究リーダーとして、映像メディアやスポーツ支援、検査などさまざまな応用分野を切り開い

てきた。

その鍵となるのが光学装置の高速な制御だ。回転軸にミラーを取り付けたガルバノミラー（駆動鏡面）でカメラの向きを高速に切り替え、動く対象を即座に追いかける。これに東京大学の石川グループ研究室が開発した高速画像処理技術を組み合わせることで画像計測を行う。特に、屋外を含めて、広い範囲を動き回るモノを計測するのが末石さんの研究の特徴といえる。

### メダカを個体認識し追跡する

東大石川グループ研究室は、これまでにガルバノミラーを用いた高速の視線・光軸制御デバイス（サッカードミラー）を開発し、卓球のピンポン球のように高速かつランダムに動く対象の画像計測に成功している。画面の中央に球がくるように自動的にカメラが動くため、「人間のカメラマンでは難しい、スポーツなどの決定的瞬間をスロー映像で捉えられる」（末石さん）という。

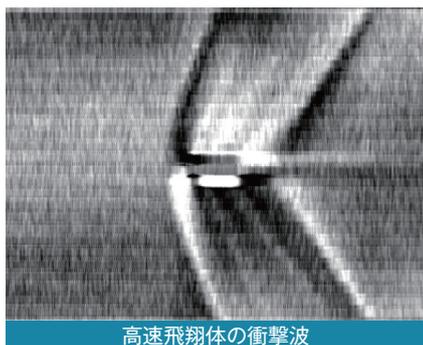
同様に、従来は難しかった自動車や飛行機などの高速移動体や、鳥、昆虫といった飛翔する生物の動きも記録できる。例えば、科学警察研究所と共同で、科学捜査への応用を目指し、音速で飛ぶ飛翔体の周囲に生じる衝撃波を画像で計測することに成功している。

水中を泳ぎ回る魚の画像計測も可能だ。末石さんはミラーを高速に制御し、メダカを追従しながら高解像度のカメラで撮影する手法を考案した。濃淡のある画像を白と黒の2値に変換する「2値化」処理などを楕円形の領域で行い、この領域の認識を更新し続けることで、メダカの頭部付近を継続的に観測する。「魚群の中でも特定の個体を認識して追跡できるほか、心拍の計測など、個体ごとの健康管理を拘束せずに行うことが期待できる」（同）といった大きなメリットがある。技術的には人にも応用できそうだ。

### サッカー、ゴルフスイングなど 多様な投影システムを開発

ACCELでは、プロジェクターを使った拡張現実感である「プロジェクションマッピング」による、複数の投影システムを開発した。まず開発したのが、人が手で持って動いているうちに花火の映像などを投影するシステムだ。これ以前に、跳躍するボールに地球の映像を投影する試みも行ったが、そこでは映像の変形ができなかった。

サッカードミラーを用いた広範囲に動く物体の追従投影方式と、形状の変



高速飛翔体の衝撃波



泳ぐメダカを追従して撮影

サッカードミラーを用いて高速でランダムに動く対象を画像計測



人の手で持って動いているうちわへ花火の映像を投影



動き回るボールへのプロジェクションマッピング



ゴルフのクラブヘッドが描く軌道を計測してリアルタイムで床面に投影



注視点を模した部分に高解像度の映像を投影する「追従的投影モザイクング」

### ACCELの成果であるプロジェクションマッピングによる投影システム

化に対応した高速プロジェクターによる投影方式を組み合わせ、広い領域を回転・変形しながら動く動的な対象に投影できるようにした。既存のプロジェクションマッピングは建物など静止した対象に向けたものが多い。末石さんは「ダンスや大道芸など、ダイナミックな動きを伴うステージ上のパフォーマンスなどに使える」と期待する。

スポーツ支援も末石さんのキーワードだ。サッカーやバレーボールなどの球技スポーツを想定し、回転するボールにピッタリと貼り付くように投影可能なシステムを開発した。奥行方向に広く計測できる「円周マーカ―」を球体上に配置し、毎秒500コマ(500fps)の速さでボールを追従しながざれることなく投影できる。手や足でボールに触れても球体の位置や姿勢をうまく認識できるという。

続いて、東京大学情報基盤センター特任研究員の宮地力さんと取り組んだのがゴルフ。ヘッド付近にマーカ―を

取り付けたゴルフクラブを1台の高速カメラだけで追従撮影し、その3次元的な姿勢情報からヘッドが描く軌道をリアルタイムに計測する。そこに乗れば安定したショットが打てる「スイング平面」を計算し、高速プロジェクターで床面に投影する。既存の映像によるトレーニングは後から自身のスイングを確認する方法だが、高速に投影フィードバックが可能なこの手法を使えば、その場でスイング軌道の善し悪しを判断できる。ゴルフに限らず、効果的なリアルタイムトレーニングシステムとしての可能性を開く。

このほか、プロジェクションマッピングの映像を広域に映す上で、人間が注視した部分には高解像度の映像を投影する、没入感のある「追従的投影モザイクング」システムなども開発している。画素数の制限があるプロジェクターの投影像の欠点をカバーする技術だ。日本地図を投影し、注視点を模した位置に合わせて一部を詳細に映し出

す装置を試作した。

### 分野を横断する研究でイノベーションを創出

光学系の制御と画像処理の“二刀流”で研究を進める末石さん。そこに、最近スポーツという新たな軸が加わった。「多様な専門が交わる場所に面白みがあると感じており、分野横断的な研究によってイノベーションの創出に貢献できたら」と末石さんは今後を語る。

画像計測の応用シーンは、映像関連から工場などの検査用途、FA(ファクトリーオートメーション)機器、ロボットまで幅広く、実際の研究はある課題に対して技術で解決策を提示するコンサルティングのようだ。「画像計測技術をベースにしてニーズを掘り起こし、各方面の要求に応える中でさらに技術を磨いていきたい」と、末石さんは社会の難題にこれからも挑戦していく。

# 人間と機械が協調して 高精度・高効率作業を実現

## 人間の知能と機械の高速・高精度を一体化する

東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門  
黄守仁 特任講師



工場で組み立て作業などを行う産業用ロボットは、人間では難しい精緻な動きが可能だ。その反面、人間がプログラミングした決まった動作しか行え

ないという欠点がある。一方、人間は作業に対して柔軟に対応できるが、高精度かつ高速な動作が難しい。こうした長所の異なるロボットと人間が協調し、人間の動作をロボットがうまく補助できるようになれば、課題に対して柔軟かつ高速、高精度な作業が可能になるだろう。

東京大学特任講師の黄守仁さんは同大学准教授の山川雄司さんとともに、東京大学の石川グループ研究室で開発した高速ビジョンシステムを使って高速性と高い精度を両立した動的補償手法を考案し、産業用ロボットに適用した。これにより「人間とロボットの運動を統合してより細かい作業ができるようになり、将来は人間の運動能力の

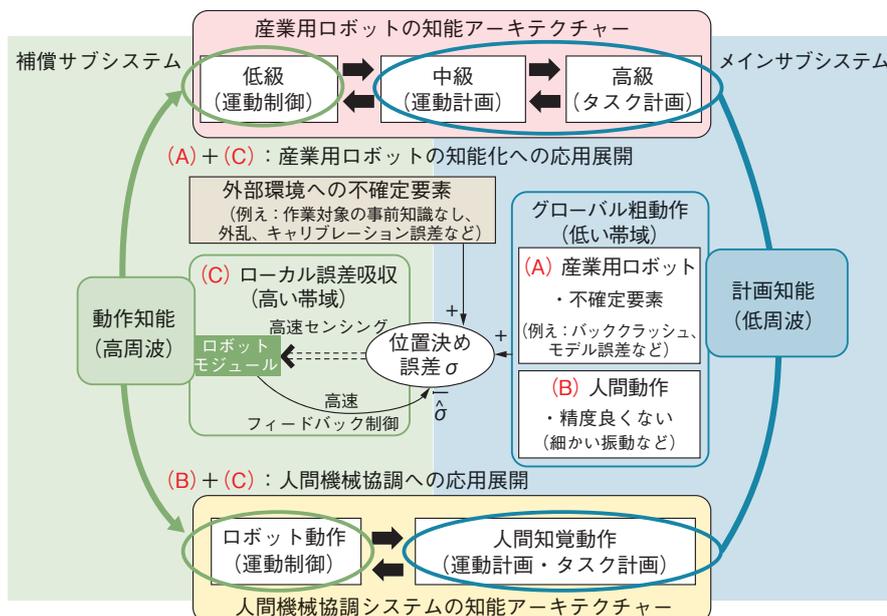
拡張にもつながる」と黄さんは考えている。

### 動的補償モジュールを搭載

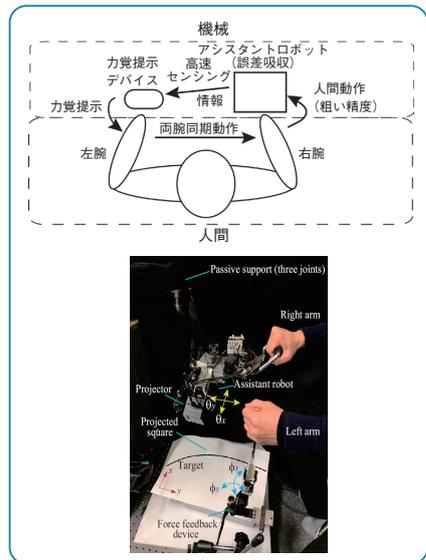
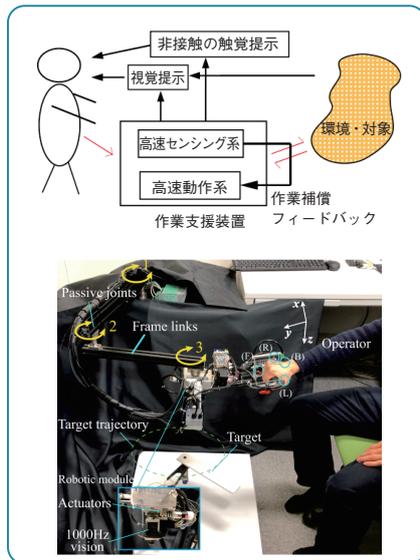
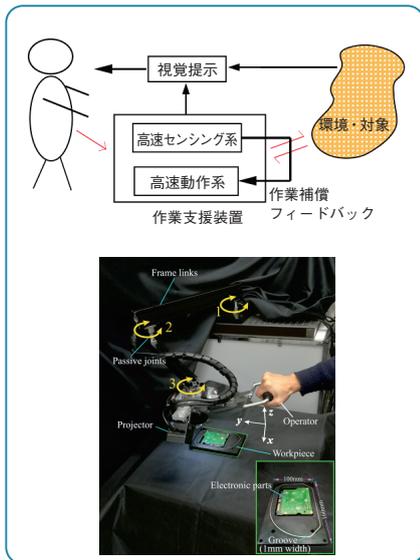
黄さんの研究テーマの一つが、このような産業用ロボットの知能化だ。黄さんはまず、ロボットの知能実現を運動制御レベル（低級）、運動計画レベル（中級）、タスク計画レベル（高級）の3段階に構造的に分離した。その上で動的補償などの手法を適宜導入し、柔軟かつ高速、高精度な作業が可能で知能ロボットを開発している。

従来の産業用ロボットは基本的にモデルベースで制御されているが、高速性や位置決め精度はモデルの正確さに依存する。ロボットモデルや環境モデルを厳密に作り込むのは事実上不可能なため、結果的に動作時のブレや位置決め誤差などが生じてしまう。それらを解消するために、これまで多くの手法が提案されてきたが、計算量が膨大だったり、事前準備に時間がかかったりするなどいずれも現実的な方法ではなかった。

動的補償モジュールを産業用ロボットの手に搭載すると、ロボットあるいは外部環境に不確定要素があっても、高速の視覚フィードバックによって不確定要素による誤差を補償するため、精度の高い位置決めが可能になる。この動的補償モジュールを使って黄さんが開発したのが、ペグ・アンド・ホールアラインメントのような位置合わせを全自動で行うロボットだ。



動的補償に基づく知能システムの実現



これまでに開発した人間機械協調システム

汎用の産業用ロボットと動的補償モジュールを組み合わせ、前者がカメラで検出した穴の位置を簡単なキャリブレーションによる座標変換をして大まかな精度で位置決めを行う。さらに、後者がロボット自身や外部環境からもたらされる細かい誤差に対して1ミリ秒ごとの視覚フィードバック制御により補償する。この2部構成により、既存のロボットを活用しながら、作業速度と精度の向上を実現した。このほか溶接や塗布作業など向けに、曲線に沿って精度良くなぞるといった、任意の平面軌道に対する高速かつ高精度の追跡（トレーシング）ロボットも開発している。

## 視覚や触覚、力覚も駆使

このように産業用ロボットの知能化は進み、実用段階にきているものの、やはりすべてをロボットに任せるには限界がある。そこで黄さんは二つ目のテーマとして、人間と機械による協調システムの開発を掲げている。先ほどと同様に、広範囲だが精度は粗くてもよい知的なタスクを人が担い、高い精度が必要な部分はロボットが担うという2部構成でシステムを構築する。

特にACCELで黄さんと山川さんは、高速ロボットモジュールとのイン

タラクションを実現するために人間の視覚や触覚など感覚を統合したフィードバックインターフェースを構築し、幅1ミリメートルの細い溝に沿って0.1ミリメートルほどの精度で検査や塗布作業などを模擬したタスクを行う人間機械協調システムを開発した。人間の視覚の反応速度はそれほど速くないため、手にシュッと空気圧を与える触覚提示を加えることで安全かつより速い動的対象に対する高精度作業を可能とする人間機械協調システムを実現している。人間は状況に応じてロボットの手先を大まかに動かすだけでなく、ロボットが誤差を補正しながら高速に位置を微調整してくれる。

これに加えて、人間の両手は自然に同じ動きをする傾向があるという「両腕同期運動」を利用した、力覚提示を使った新しい人間機械協調システムも開発した。高速ビジョンと高速アクチュエーターを搭載したアシスタントロボットを人間が右手で握り、高速フィードバック情報などから、力覚提示デバイスを通じて左手に動作する方向や度合いなどを指示する。すると、人間が左腕を動かしながら、右腕も自然な同期動作をさせることで、作業対象を常にアシスタントロボットの限られた動作範囲内に限定させる。それと

同時に、アシスタントロボットが高速で誤差を補正し、位置決めを行ってくれるという仕組みだ。

## ロボットが人を助け、能力を高める

今後は人間が考えてロボットを動かすのではなく、電気刺激などによって腕など身体の一部を外から制御するという手法も検討する。身体の不自由な人のリハビリテーション用途のほか、ロボットが補助することで、こうした人でも手先をうまく操れるような方法が見いだせるかもしれない。

その先には、誰もがこうした協調システムを使いこなし、人間の能力を拡張する未来がやってくるだろう。「人間と高性能な機械が一体化した次世代のサイボーグシステムを創造する。今後はそうした方向でも研究を進めたい」と黄さんは意欲を燃やしている。

人とロボットは同じ作業をする必要はない。「人間は人間の得意なところだけをやり、繰り返し高精度作業など人間にとってストレスとなる作業や困難な仕事はロボットに任せる。そうすれば人間の負担は減り、全体の作業効率も高まる」と黄さん。人とロボットは互いに補い合う関係になりつつある。

新機能が生まれる  
セキュリティー  
システム

# 人の正面顔を正確に認識する セキュリティーシステムの実現

## 高速カメラと分散処理技術による 高速ビジョンネットワーク

東京大学 大学院情報学環・学際情報学府

山川雄司 准教授



東京大学准教授の山川雄司さんは、ロボットに多様な仕事をさせるための「ロボットマニピュレーション」の研究を手がけてきた。高速カメラで撮像した莫大な画像データをコンピューター処理し、高速・高精度にロボットにフィードバックして、遅延なく目的の動作をさせるには「ビジョンネットワークシステム」が計測の基盤技術と

なる。ACCEL では、この基盤技術を確立するとともに人の正面顔を正確に認識するセキュリティーシステムを構築した。

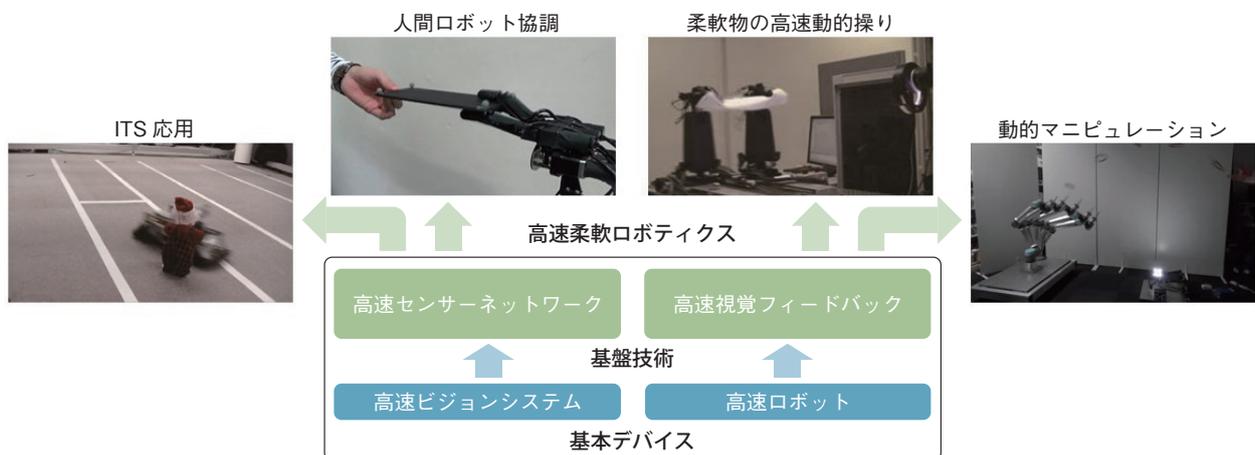
### 人間とロボットの 協調システム

「近年のロボットに関するメインの研究テーマは『人間とロボットの協調』で、大きく分けて3種類のアプローチ方法がある」と山川さんは語る。一つ目はロボットの遠隔操作。人間の手の位置や動きを高速カメラで計測し、異なる場所にあるロボットハンドにフィードバックして同じ動作を再現させる。ロボットハンド側では、操作対象である物体の変形状態を高速カメラで捉えてデータ処理することで物体の硬軟情報も認識できる。人が容易に立ち入ることができない現場での活躍が期待される。

二つ目はロボットによる作業支援

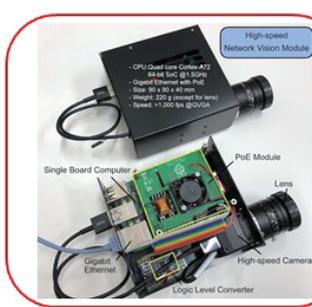
で、柔軟性は高いが速度と精度に限界がある人間の動作をロボットで補完する。応用例としては、マイクロメートル単位の凹凸がある物体同士を結合する繊細な作業があげられる。凹部のある物体をアクチュエーターに固定し、凸部のある物体は人が把持する。この時に高速カメラが凹部と凸部を検出すると同時に、位置の誤差を計測し、誤差がなくなるようにアクチュエーターが凹部の位置を制御することで作業をサポートする。

三つ目は人とロボットの協同作業。人の動きに対して瞬時にロボットが反応できるようにする。例えば、人とロボットが一つのボードの両端を持って運ぶ作業の際に、高速カメラでボードの位置と姿勢を計測してロボットにフィードバックすることで、人が自由な高さや向きにボードを動かしてもロボットが追従し、ボードを水平に保ち続ける。

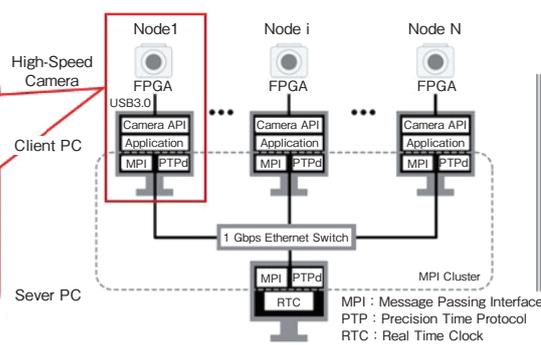


主な研究領域。ロボットを瞬時に操作するための高速ビジョンネットワークシステムなどが基盤技術

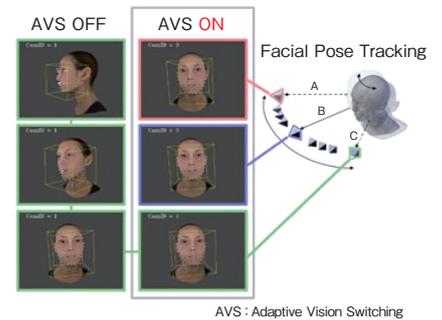
## ネットワーク対応型 高速ビジョンモジュール



## ビジョンネットワークアーキテクチャー



## 正面顔トラッキング



セキュリティシステムの概要。独自の高速ビジョンネットワークが中核技術

## 分散並列処理による 正面顔のトラッキング

ACCEL で取り組んでいるセキュリティシステムの研究では、これらロボットマニピュレーションを実現する基盤技術となるビジョンネットワークシステムを開発している。山川さんとともに研究の主体を担ったのは、東京大学特任助教の金賢梧さん。本システムの開発にあたって、高速カメラやシングルボードコンピューターなどを一体化したビジョンモジュールとネットワークアーキテクチャーを設計して規模を拡大し、独自の「高速ビジョンネットワークシステム」を構築した。

セキュリティ関連アプリケーションでは、いかに正確に顔認識を行うかが重要な課題の一つ。金さんは、「このシステムの特徴は、人の移動によって時々刻々変わる顔位置や姿勢を反映しながら、常に正面顔をトラッキングできることで、そうすることで顔検出と認識の精度が向上する」と話す。

ネットワークは複数の階層からなる。第1階層が端末となるビジョンモジュール、その上位の階層はローカルサーバー PC だ。ビジョンモジュールは高速カメラとシングルボードコンピューターで構成され、1ユニット当たり8台のモジュールが用いられる。第2階層のサーバー PC は直接ユニッ

ト内モジュールの同期制御を担当し、さらに上位側のサーバー PC へとつながられる。目的や規模に応じてユニットや階層を増やすことができ、さらなる高機能化が可能な構造を提案した。8台のビジョンモジュールは同期しながら、それぞれの設置場所で人の顔を撮像する。使用する高速カメラは毎秒1000コマ(1000fps)もの高速撮像が可能だ。画像フレーム間の時間間隔が非常に短くなるため、人の動きを瞬間ごとに捉えられる。

撮像した多量の画像データはシングルボードコンピューターで処理される。人の顔を検出した上で、正面顔のトラッキングに最低限必要なデータのみを抽出することでデータ量を小さくし、2階層以上の上位階層での処理にかかる時間の削減や効率を高める工夫がなされている。各ビジョンモジュールで処理したデータは、それぞれが同じタイミングでサーバー PC へと転送され、統合・共有される。

ここでの処理データに基づき、正面顔を一番よく表現するビジョンモジュールを特定し、そのモジュールから顔映像を取得する。処理データに応じて随時モジュールが切り替わる(AVS)。さらに、顔映像から顔の姿勢を直接求めることができる機械学習方法を導入し、システムの高速化を図った。

このシステムの特徴は高度な分散並列処理を行うネットワーク技術だけではない。使いやすさにもこだわった。金さんは「小型・軽量や接続の容易さ、低コストなど、汎用性も念頭に開発した」と語る。

## 新たなロボット制御技術へ展開

金さんは、「システムの規模を少しずつ大きくし、大勢の中から複数の人物の追跡や特定の人物の認識をできるようにしたい。さらにはさまざまな情報と統合できるまで発展させたい」と、今後の目標を掲げる。セキュリティ以外の分野への展開も期待される。複数台のカメラを使ってあらゆる角度から対象物の形状を撮像し、それらのデータを統合して3次元形状を作り出すシステムなどが候補だ。

山川さんは、今回構築した高速ビジョンネットワークを機能的にも性能的にも拡張していくとともにロボット制御の分野に応用していく考えだ。「これまでは1~2台の高速カメラによる小規模システムを用いていたが、今後は今回構築した新たなビジョンネットワークシステムが基盤となる。どのような価値やアプリケーションを生み出せるのか。それを検討し、実際にロボットで実現するのが次のステップになる」と意気込みを見せる。

新機能が生まれる  
セキュリティー  
システム

# カメラ1台で複数台の役割を果たす 監視システム

## 高速ビジョン技術による トラッキング型広域監視システム

広島大学 大学院先進理工系科学研究科

石井抱 教授



広島大学教授の石井抱さんは、高速ビジョン技術を活用した高速トラッキングカメラや、“振動の見える化”を実現する振動スペクトルカメラなどのアプリケーションやアルゴリズム開発を主な研究テーマとして取り組んできました。ACCELでは、その技術をセキュリティー分野に適用し、広域サーベイ

ランス（調査監視）を可能にした監視システムを開発した。すでに顔認証が可能な監視システムはあるが、狭い範囲しかカバーができないという弱点があり、広い範囲をカバーしようとすればカメラが複数台必要で、その解析に負荷がかかっていた。

### 振動で物体を識別する

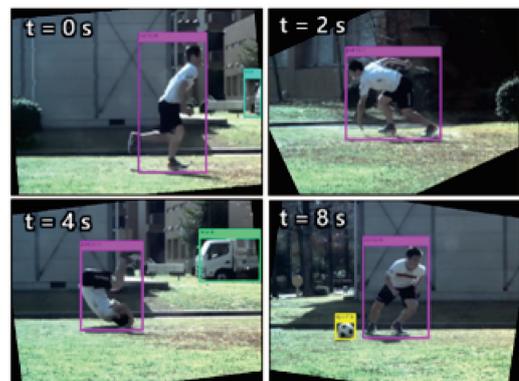
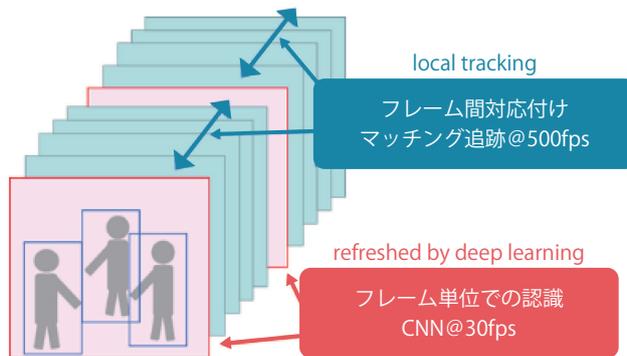
振動スペクトルカメラは、数百メートル先を飛ぶドローンや、数百匹のミツバチをトラッキングするというもの。この時に対象を識別するのは、一般に人が認識する形状や色といったものではなく、「振動」である。ドローンはプロペラが回転することで飛行する。回転するプロペラは人間の目では捉えることはできないが、毎秒1000コマ（1000fps）で撮影できる高速カメラなら、回転しているプロペラまでしっかりと捉えられる。撮影した画像

から、プロペラの振動を反射する光（明るさの変化）として捉えて処理する。つまりプロペラがあるところはオン、なければオフと認識し、このオンとオフを追いかけるようにカメラをプログラミングしているのだ。数百メートル先では、形状や色はあいまいな画像となるが、光のオンとオフを捉えることで高精度にトラッキングできる。

ミツバチも同様に追従できる。ミツバチは1秒間に150～250回羽ばたいて飛翔する。この範囲の光の明滅を捉えるようにプログラミングしておけば、カメラはミツバチを自動で追従する。

この技術は、画像の解像度は問わないことが強み。形状や色を認識しようとすると、ある程度ズームした画像が必要になり、画像の処理に時間もかかる。しかし光の明滅を識別するだけなら、広角で撮影して、必要なところだけ処理すればいいので負担はずっと軽

### 深層学習を内包した高速人物追跡アルゴリズム

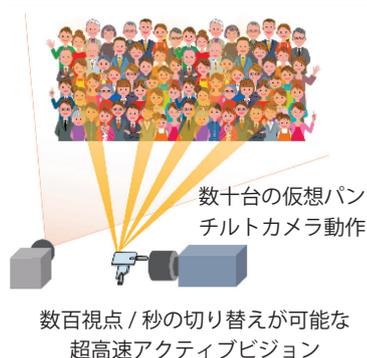


遅延のない高速トラッキングの実現

姿勢変化に頑強な 500fps 人物追跡

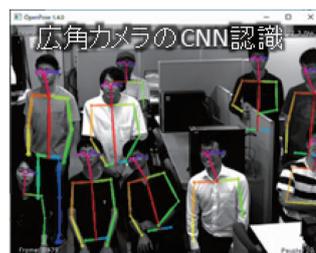
高速人物追跡アルゴリズム。対象の追跡は500fps、画像の認識は30fpsで行うことで遅延がなくなる

## マルチスレッドアクティブビジョン



高速ビジョンが複数のパンチルトカメラに分身

## 同時顔ズームアップシステム



マルチスレッドアクティブビジョン。全体を高速で撮影し、対象部分だけを切り取ることで、複数台のカメラを使ってズームで撮影しているのと同じ認識が可能になる

減できる。

振動スペクトルカメラは、産業現場への実装が期待されている。例えば、工場の機械が故障して異音が発生したとする。音をマイクで拾う方法だと指向性が低いため、さまざまな音が飛ぶ交う工場内で異音だけを頼りに原因となっている箇所を特定するのは難しい。しかし高速カメラで機械を撮影すれば、正常な時との振動を比較して、異音の発生している位置を簡単に特定できる。任意の周波数を設定すれば、それから外れた周波数をリアルタイムで表示できる。

## 広域型監視システムの構築

ACCELで石井さんは、高速ビジョン技術と人工知能（AI）を組み合わせ、セキュリティ分野への展開を目指した。「高速カメラを使ったトラッキング技術を使えば、広域型の監視システムが構築できるのではないかと考えたのがスタートだった」と石井さんは話す。1台のカメラと1台のコンピュータで、数十台分のカメラと同じ範囲をカバーするのが狙いだ。

これまでのような固定型カメラで広範囲を撮影すると、対象の人物が「どのような表情をしているか」「何を

持っているのか」までは詳細にはわからない。ズームをすればこれらは解決できるが、撮影できる範囲は狭くなってしまふ。多数の人が行き交う雑踏などの環境では限界があった。そこで石井さんがとったのが、高速カメラを使いAIによる画像処理を行った上で、常に対象の人物をズームトラッキングするというアプローチだ。

しかし、今度はAI画像処理に時間遅れが生じてしまうという壁が出てきた。そこで、この時間遅れを取り戻すため、1フレームの間に数十フレームの画像を一気にプレイバック追跡するというアルゴリズムを開発。これによって高速な撮影に遅れることなく、追跡、認識が可能になった。

また高速カメラは例えば毎秒500コマの画像が撮影できるため、1台のカメラでいくつもの視点を実質的に“同時に”認識することも可能になる。それは次のような仕組みだ。1視点の追跡、認識に必要なのは毎秒10～25コマ。つまり500/(10～25)で20～50視点程度の同時認識が可能ということになる。すでに「実験では500視点まで増やすことに成功している」と石井さん。視点を切り替えられる高速カメラが60台以上のAIカメラ

として機能して、これらの視点を状況に応じて自動的に切り替えることを実現している。

また全方位赤外レーザーセンサーと連動することで暗闇での運用もでき、撮影範囲内に映ったものを追跡し、人や車とわかった時点で白色光源に切り替えるというシステムも可能だ。これを使えば、防犯だけでなく、刑務所内などの監視にも役立てることができると期待されている。

## フリーゲートシステムも

石井さんはフリーゲートシステムへの活用も視野に入れる。空港の出入国管理をスムーズに行うためにQRコードが活用されているが、現在はQRコードを読み取り機にかざさなければならない。しかし、広域をカバーできるこの画像処理技術を使えば、QRコードが表示されたスマートフォンなどを手に持っているだけで読み取りが完了する。なおかつ顔認証と組み合わせた二重のチェック体制も可能になる。今後、精度が上がれば遠隔からの指紋認証システムへの応用もでき、コンビニエンスストアの無人化に対応した決済システムなど、幅広い活用法がありそうだ。

## 高速画像処理を用いた知能システムの応用展開 2021

---

発行日：2021年3月31日

発行：科学技術振興機構 ACCEL「高速画像処理を用いた知能システムの応用展開」  
プロジェクト（研究代表者 石川正俊、プログラママネージャー 岸則政）

製作：日刊工業新聞社

取材・執筆：藤木信穂、木村孝生、高橋沙世子、大久保亘

編集：奥村功

協力：谷真由美、小林健人

表紙デザイン：多田直矢

レイアウトデザイン・組版：志岐デザイン事務所、新日本印刷

---

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）の支援を受けたものです。





JST-ACCEL  
「高速画像処理を用いた知能システムの応用展開」  
(2016～2021)  
研究成果集