

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500142

研究課題名(和文)安全配慮姿勢を育み応用力を強化する化学実験支援システムに関する研究

研究課題名(英文)A study on a chemistry experiment support system that facilitates students to increase the awareness of safety

研究代表者

藤波 香織(Fujinami, Kaori)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10409633

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文):本研究では,高等教育機関で化学実験の授業で利用することを想定し,作業者が将来独立しても安全に実験に従事できるような,新しい支援方法を開発するとともに,現場への導入容易性を追求したシステム構成法を明らかにすることを狙った.  
統制された実験のみならず,プロトタイプシステムを開発した上でのユーザ評価を通じて,1)危険回避と応用力醸成のためのメッセージの内容と提示場所に関する解釈の困難さの調節指針,2)応用力醸成のための正解の伝達機構,3)プロジェクタで投映された情報の視認性とプロジェクタ光のもとでの物体認識性能の向上手法,4)微小物体の高精度(誤差1.5cm以下)な測位と物体識別手法,を明らかにした.

研究成果の概要(英文):The objective of this project is to investigate a method that allows university students to learn safe ways of chemistry experiments while keeping them safe during experiments. This is because students can be supported by a system in their school days, but they will be required independently after graduation. We also focused on exploring system architecture that is easy to deploy into existing lab.

As a result of controlled experiments and prototype development followed by a small scale user study, we achieved the following: 1) showed a message design principle to set an appropriate level of ambiguity in the contents of a message and its position of presentation for the purpose of avoiding danger and avoiding dependency, 2) introducing "thinking time" in the question-answer-based learning system, 3) improved the legibility of projected information and the accuracy of recognition under projected lights, and 4) fine-grained positioning of tiny objects (<1.5 cm) and their identification.

研究分野: ヒューマン・コンピュータインタラクション

キーワード: 拡張現実感 学習支援システム 化学実験 ヒューマン・コンピュータインタラクション 作業支援

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、教育機関における化学実験の安全作業支援システムとして、「安全」という恩恵を享受しつつも、依存を避けること、すなわち「安全ボケ」を防ぐことを目指した。これには、工事現場などで作業前に行われている「危険予知トレーニング (KYT)」に見られるように、危険の内容や発生源、対処方法などを作業員自ら考えて回避行動をとるよう安全配慮姿勢を育むことが重要であると考えた。そして、潜在する危険による事故のリスクが十分低い場合にはその原因や回避方法を特定するために、作業員が積極的に状況理解に努めるような提示を行い、「正解」も同時に教示することで、類似の事例に対する応用力の醸成 (依存の回避) を行うこと、その逆の場合には、正確かつ迅速に対象を特定させて危険回避に導くことを狙った。

一方、いわゆるスマート空間は、ユビキタスコンピューティングの文脈で国内外で数多く試作されてきたが、導入・維持費を度外視できる場合を除きほとんど実用化に至っていない。本研究では、初期段階から化学実験室特有の課題 (耐熱・耐薬品、十分な視野確保の必要性、作業状況把握に必要な物品や行動の多様性、実験卓のような既存設備交換の困難さを考慮した構成法) を追求して、現場での評価実験や成果移転を円滑に行えるようにする必要があった。

科研費基盤研究 (C) 21500117「化学実験非熟練者の安全技能を向上するスマート実験室に関する研究」(平成 21-23 年度) の中で、メッセージが指す危険源を特定しにくい場合には、作業員は積極的にその解決に努め、次に類似の場面に遭遇した場合にその状況を想起できる可能性、すなわち応用力醸成の可能性が示唆された。メッセージの「内容・提示場所・タイミング」の 3 要素が「危険源の特定難度」に影響を及ぼすことも分かっているが、危険回避と応用力醸成の効果を狙い通りに発揮するための調節方法は、十分解明されていなかった。

システム構成手法に関して、プロジェクタによる卓上情報提示においては、密集状態の複数の物体の中央付近に提示されたり、実験器具の背丈や幅により物体への重なりが生じたりすることを確認し、危険回避の点から対策が必要であることを確認した。また作業妨害回避の点から、より小さな (1.5cm 四方; 現行は 3cm 四方) 視覚マーカーの最適な貼付位置やカメラの配置を決定することが必要であることを確認した。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、以下を目的として取り組んだ。

(1) 危険回避と応用力醸成のためのメッセージ抽象度とその効果の関係の理解

狙い通りの効果を発揮するメッセージの設計方法を明らかにする

(2) 応用力醸成のための正解の伝達機構開発  
実験作業を妨げずに実施可能な、正解伝達メッセージの 3 要素 (内容・提示場所・タイミング) の設計方法を明らかにする。

(3) プロジェクタ投影と対象物の正確な関連づけ方法の開発

緊急時や正解教示時の危険源の確実な特定のために、投影位置から目的の物体への吹き出し状の表現の適用を検討する。その際に、対象物の大きさを反映して情報が物体に重なることで視認性が低下することを防ぐ。

(4) プロジェクタ・カメラシステムにおける投影補正を用いた物体認識手法の開発

プロジェクタを使って情報表示をしつつ、投影面と同一の平面上の物体の識別や位置検出にカメラを用いる場合に生じる、投影光による計測・認識への影響を軽減する機構を開発する。

(5) 微小物体の ID と位置特定方法の開発

既開発しているシステムでは 3 cm 四方の視覚マーカーを物体に貼付していたが、試験管のような微小物体に取り付けるとかえって邪魔になるという結果がでていたため、微小物体であってもその ID と位置を検出する手法を開発する。

(6) 卓上作業の作業方法の教示手法の理解

化学実験のような卓上作業の作業遂行を支援する教示情報の提示方法をアプリケーション的観点から理解する。

### 3. 研究の方法

前項に対応した以下の取り組みを行った。

(1) 危険回避と応用力醸成のためのメッセージ抽象度とその効果の関係の理解

既報の文献[1]にもとづき、メッセージの内容・提示場所に関して、その抽象度を {低, 高} の 2 値に分けた提示を行った場合の理解性と学習性に関するデータを分析した。理解性は、情報が指している対象の特定の速さと正しさ、学習性は覚えやすさと思出しやすさのそれぞれ 2 点から評価した。

(2) 応用力醸成のための正解の伝達機構開発

別の抽象度が高いメッセージの一つとして、質問形式を取り上げ、質問の一定時間経過後に正解を提示する手法を提案した (図 1)。

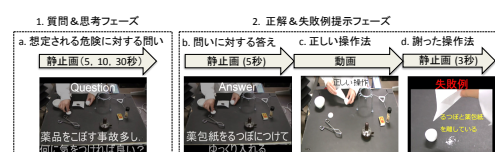


図1 思考時間を持たせた安全学習法

その際に、正解提示までの時間（0, 5, 10, 30 秒）と学習効果の関係を分析した。学習効果は学習前後に所定の実験動作を行った際の不安全動作の出現回数を計測した。また、思考時間の長さに対するユーザの主観意見を収集した。

### (3) プロジェクタ投影と対象物の正確な関連づけ方法の開発

実施にあたり、①物体の説明を付加する吹き出しと他の吹き出しとの重複を避けること、②吹き出しと他の物体との重複や作業者の死角への提示を避けることを考慮した。

①は予備実験の結果、重なりは視認性に与える影響が大きいことが判明した。よって、作業者の視点から、単に重複がないことを重視するのではなく、吹き出しと対象の関連づけの速さと正しさも考慮した。

②については、物体の形状を事前に計測しておき、CG における平面上への影投影法を応用した影領域反映型の重複回避提示手法（図 2）を開発した。投影情報と物体の重複は机の上の影領域を避け、ユーザからの死角領域はプロジェクタの位置を「視点」に置き換えて同様の手法で計算することができる。物体の底面に加えてこれらの影領域と死角領域を物体領域として①の手法を適用することで、どこからでも情報を見ることができる。さらに、市販の深度センサを用いて得られる点群から動的に直方体近似を行う手法を開発した。

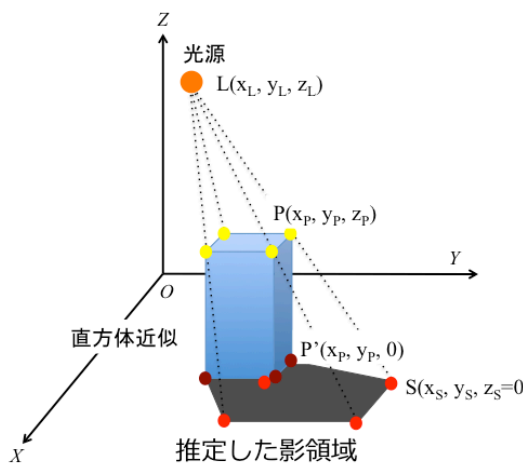


図 2 平面上に出来る直方体の影を推定

### (4) プロジェクタ・カメラシステムにおける投影補正を用いた物体認識手法の開発

物体認識に適した白色光が投影された投影面の状態が推定できれば、カメラによる撮影後にこの状態をはさんで通常認識処理を実施することが出来ると考え、この投影状態（非投影状態と定義）の推定の基礎検討を行った。非投影状態は、プロジェクタ光に対する投影面の応答特性を用いて動的に推定する。投影面の応答特性は、文献[2]で提案さ

れている色補正手法の副産物として得られるが、線形を仮定していた文献[3]と異なり、本研究では一般的なプロジェクタが持つとされている非線形的な応答特性に対応できるよう拡張した。

### (5) 微小物体の ID と位置特定方法の開発

既報文献[1]では物体に 3cm 四方の視覚マーカーを貼付し、卓上方に設置したカメラから直接その認識処理により個体識別と位置検出を行っていたため、マーカーの小型化に限界があった。このためまず、①手首に取り付けた拡大可能カメラによる微小マーカー認識と卓上方カメラによる手首の通常マーカー認識による 2 段階認識手法を開発し、視覚マーカーベース手法の改良を図った（図 3）。その後、②深度センサを用いた物体形状情報取得によるマーカーレス個体識別と位置検出手法に取り組んだ。始めに背景（机）を除去して物体領域を切り出した後で、予め形状情報を用いて訓練済みの個体識別器を用いて物体の識別を行う。評価は、化学実験との類似性が指摘されている「紅茶をいれる」作業により行った。

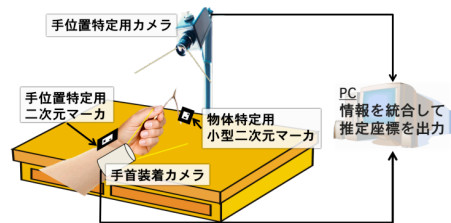


図 3 2 段階認識による微小物体位置検出

### (6) 卓上作業の作業方法の教示手法の理解

アイロン台上で行う「アイロンがけ」を対象に、しわを取るための情報支援法を検討した。衣類の台上への設置手法や効率的なアイロンがけのための部位の指示手法や、しわ位置の提示手法の実現手法を考案し、プロトタイプシステム開発とユーザ評価により有効性を検証した。

## 4. 研究成果

前項に対応した以下の成果を得た。

### (1) 危険回避と応用力醸成のためのメッセージ抽象度とその効果の理解

実験作業中に提示するメッセージの内容および提示場所についての解釈の多さ（それぞれ意味的多義性と空間的多義性と呼ぶ）と、その効果の使い分け方法として以下の知見を得た。

- ・ 目の前の危険回避を重視する場合: 迅速に正しく警告メッセージが指している危険の源を特定する必要がある。実験で扱う器具や薬品に固有の危険が予想される場合は、意味的多義性と空間的多義性をいずれも低く設定するが、日常一般にみられる普遍的な危険については意味的多義性を低

く、空間的多義性を高く設定する。

- ・ 将来の独立した作業のための学習を重視する場合: 提示された情報を学習し、一定期間経過後に想起できる必要がある。このため、意味的多義性を低く、空間的多義性を高く設定する。

メッセージの内容を意味的多義性の度合いに注意して適切に設定することで、生物や物理など他の学生実験に適用することも可能であると考えられる。なお、本成果は論文①として出版された。

### (2) 応用力醸成のための正解の伝達機構開発

図1に示したように、思考時間を0, 5, 10, 30秒に変化させたコンテンツを用いた学習効果検証実験の結果、思考時間を設けずに即座に正答を与える方法(思考時間0)と比較して、思考時間5秒および10秒のときに有意に学習効果が認められ、不安全行動が減少していた。

一方、思考時間の長さや理解のしやすさに関する被験者の主観意見として、短すぎる(5秒)と理解が難しいが、10秒程度あれば机上を見回して理解するのに十分であるという回答が得られた。長すぎる場合には、早々に自身の中で答えに達して暇をもてあましたり、反対に答えを見つけないまま時間が経過して飽きてしまったりする声が聞かれた。よって、作業者が主体的に思考に従事している時間を推定して、期待が最も高い状態で正答を与えることで学習効果の更なる向上が期待できる。

なお、本成果は論文③として出版された。

### (3) プロジェクタ投影と対象物の正確な関連づけ方法の開発

物体の説明を付加する吹き出しと他の吹き出しとの重複回避は、Azumaらが提案したGD (Gradient Descent) 法(文献[2])を拡張し、GD法では固定長であった吹き出し線(リンク線)の長さを可変にして重複がない場所を探索する手法(Non-overlapped GD: NGD法)を提案した(図4)。リンク線の長さや情報が示す物体の特定に要する時間とその正しさについてユーザ評価を行ったところ、特定時間はNGD法が有意に長く、正しさもNGD法が有意に高いことが分かった。従って、実験時の情報提示のように、情報の誤解釈が問題となるような領域への適用に適しているといえる。本成果は論文②として出版された。

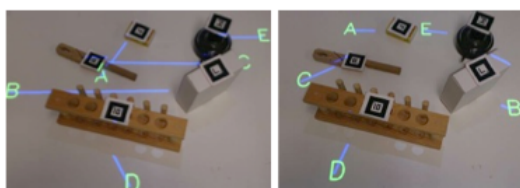


図4 NGD法の適用前(左)と適用後(右)

動的な直方体近似手法を、サイズが既知の物体を計測することで精度評価した結果、おおむね実物体のサイズより大きくモデル化されたことを確認した。このような過大評価は、大きめに物体領域を確保することを意味する。その結果、プロジェクタ光や視野との重なりを小さくするよう働くため、過小評価と比べると望ましい結果となった。

### (4) プロジェクタ・カメラシステムにおける投影補正を用いた物体認識手法の開発

プロジェクタの入出力の関係を表す近似式と混色行列の導出処理を追加することで、応答特性が非線形の場合にも文献[3]の手法を適用可能な手法を実現した。そして、投影光の色補正時に推定した応答特性関数を用い、非投影状態の推定手法を開発した。

プロジェクタ光の色補正中に非投影状態の精度関数について評価した結果、色補正時の投影面の輝度が十分に明るい条件において、非投影状態が推定できることを確認した。図5は一連の処理結果を示すものであり、オリジナルの投影画像(a)を机上の3色の紙(b)に、補正せずに投影した結果(c)と拡張した手法で補正画像を作成し(d)、(b)上に投影した結果(f)である。(f)はほとんど人目に気づかない程度に補正されている。そして、(e)が補正画像から推定した非投影面の画像である。従来は、(c)の状態での認識処理(例えば下の3枚の紙の識別)を行わざるを得なかったが、(e)を用いることで認識精度の向上が期待できる。

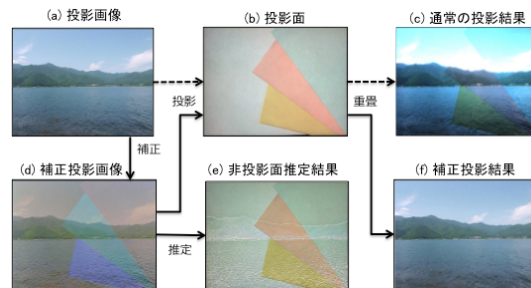


図5 投影補正による投影面の違い(cおよびd)と非投影面推定結果(e)

### (5) 微小物体のIDと位置特定方法の開発

本研究で開発した2段階認識手法(物体用マーカサイズ8mm)と距離センサ利用手法(マーカなし)の測位性能を表1に示す。この表から分かるように、2次元平面内では平均15mmの高い精度の測位を実現した。距離センサを用いた場合は、特に垂直方向の測位性能が、水平面内での測位誤差と同レベルまで改善した。このような高精度な物品位置情報を用いることで物品に特殊なセンサを装着しなくても、位置関係のみで「アルコールランプにマッチで火をつけようとしている」、「試験管立てに試験管Aが立っている」といった作業状況の理解が可能となる。

表 1 開発した 2 手法の測位性能

	2 段階認識		距離センサ	
	xy 平面	xyz 空間	xy 平面	xyz 空間
平均[mm]	10.6	27.6	14.6	17.1
95%値[mm]	20.0	52.0	24.0	27.0

なお、「マーカーなし方式」における物体識別では、深度センサから得られる 3 次元点群情報を用いて物体識別を行うが、その際の特徴量として深度センサから得られる実寸法情報が有効であることを確認した（実寸法情報無し：F 値=0.45，実寸法情報有り：F 値= 0.91）。

#### (6) 卓上作業の作業方法の教示手法の理解

卓上（アイロン台上）での作業を支援するシステムのプロトタイプ開発を通して、本研究で用いているプロジェクタ・カメラシステムの有効性ならびに設計原理の一端を明らかにした。すなわち、①固定位置のディスプレイに作業手順が表示される場合と比べて、アイロン台上の作業箇所をプロジェクタで指示する場合の方が、視線移動の回数および仕上がりが良いこと、②衣類のしわのような極小の凹凸を検出するためには、深度センサは精度が不足しており、斜め方向から投光する赤外線投光器と赤外線カメラが有効であること、③局所的にしわ位置を示すのではなく、アイロン台上でしわが検出されている部分全体を示すことで、作業者の行動プランニングを補助することを確認した。

#### <引用文献>

1. A. Sokan, M. W. Hou, N. Shinagawa, H. Egi and K. Fujinami; “A Tangible Experiment Support System with Presentation Ambiguity for Safe and Independent Chemistry Experiments”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 3, No. 2, pp. 125-139, Springer, 2012.
2. R. Azuma and C. Furmanski; “Evaluating level Placement for Augmented Reality View Management”, In *Proc. of IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR' 03)*, pp. 66-75, 2003.
3. K. Fujii, M. D. Grossberg, and S. K. Nayar, “A projector- camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments,” In *Proc. of CVPR ' 05*, pp. 814-821, 2005.

#### 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 3 件）

- ① 宗官祥史，江木啓訓，藤波香織；“警告

メッセージの内容と提示場所における多義性に着目した化学実験の安全作業支援”，*情報処理学会論文誌「インタラクションの理解および基礎・応用技術」* 特集号，Vol. 56, No. 4, pp. 1269-1277, 2015. 4.（査読有）

- ② Makoto Sato and Kaori Fujinami; “Nonoverlapped View Management for Augmented Reality by Tabletop Projection”, *Journal of Visual Language and Computing (the official DMS2015 proceedings, an extended version)*, Vol. 25, Issue 6, pp. 891-902, Elsevier, 2014.12. DOI: 10.1016/j.jvplc.2014.10.030（査読有）
- ③ Kaori Ito, Hiroaki Taguchi and Kaori Fujinami; “Posing Questions during Experimental Operations for Safety Training in University Chemistry Experiments”, *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering (IJMUE)*, Vol. 9, No. 3, pp. 51-62, 2014. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.14257/ijmue.2014.9.3.06>（査読有）

〔学会発表〕（計 14 件）

- ① 鈴木喜光江，藤波香織：“アイロンがけの残りじわ検出および初心者向け支援手法の提案”，*電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会 (MVE)*，成蹊大学（東京都・武蔵野市），2015 年 3 月 2 日。（査読無）
- ② Kimie Suzuki and Kaori Fujinami; “An Ironing Support System with Superimposed Information for Beginners”, the 2nd IEEE International Workshop on Consumer Devices and Systems (CDS2014), Vasteras (Sweden), 2014 年 7 月 25 日。（査読有）
- ③ 田中希武，藤波香織：“プロジェクタ・カメラシステムにおける投影光の色補正と物体認識のための投影面の色推定”，*電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会 (MVE)*，別府国際コンベンションセンター（大分県・別府市），2014 年 3 月 7 日。（査読無）
- ④ Kaori Ito, Hiroaki Taguchi and Kaori Fujinami; “A Preliminary Study on Posing Questions during Operations for Safety Training in Chemistry Experiments”, *Multimedia 2013*, Jeju (South Korea), 2013 年 12 月 13 日。（査読有）
- ⑤ 藤波香織；“実世界に織り込まれるコンピューティング環境とコンテキストウェアネス”，第 82 回日本ロボット学会 ロボット工学セミナー 一挙手一投足

- に反応する実世界インタフェース技術，中央大学後楽園キャンパス（東京都・文京区），2013年11月28日。（招待講演）
- ⑥ 伊藤香織，田口宏明，藤波香織；“化学実験安全教育システムにおけるメッセージ内容及び提示方法の検討”，第75回情報処理学会全国大会，東北大学川内キャンパス（宮城県仙台市），2013年3月6日。（査読無）
  - ⑦ 小笠原寿馬，岩崎正裕，藤波香織；“卓上作業支援における小型物体の位置特定と個体識別に関する検討とその応用”，第75回情報処理学会全国大会，東北大学川内キャンパス（宮城県仙台市），2013年3月6日。（査読無）
  - ⑧ 佐藤真，田中希武，藤波香織；“物体情報を用いた卓上投影型拡張現実感における情報の視認性向上と解釈阻害を防止する投影手法”，第75回情報処理学会全国大会，東北大学川内キャンパス（宮城県仙台市），2013年3月6日。（査読無）
  - ⑨ 田中希武，藤波香織；“プロジェクタとカメラを用いた拡張現実感のための物体認識精度向上に関する基礎検討”，第75回情報処理学会全国大会，東北大学川内キャンパス（宮城県仙台市），2013年3月6日。（査読無）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~fujinami/lab/ost4ce.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤波 香織 (FUJINAMI, Kaori)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：10409633

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

レンゴロ ウレット (LENGGORO, Wuled)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：10304403

### (4) 研究協力者

伊藤 香織 (ITO, Kaori)  
岩崎 正裕 (IWASAKI, Masahiro)  
小笠原 寿馬 (OGASAHARA, Kazuma)  
佐藤 真 (SATO, Makoto)  
鈴木 喜光江 (SUZUKI, Kimie)  
田中 希武 (TANAKA, Nozomu)