

平成27年度  
高知大学大学院 総合人間自然科学研究科  
応用理学コース 情報科学分野  
修士論文要旨集

# マルチ GPU クラスタシステムを用いたカラー電子ホログラフィの研究

応用理学コース 情報科学分野

荒木 啓 充

電子ホログラフィのカラー再生技術は、3次元テレビの実現に必要不可欠である。しかし、CGHの計算式には参照光の波長が含まれるため、1枚のCGHでは単色の像しか再生できない。カラー再生を行うには、光の3原色であるRGB3色のCGHが必要となる。RGB3色のCGHにより3色の像を再生し、合成することで加法混色によりカラー再生が実現される。3色の像を合成する方法として、3光源3LCD方式と時分割方式がある。前者はRGB3色個別の光源と3つの液晶ディスプレイ(LCD: Liquid crystal display)を使用してRGB3色の像を再生し、光学系により空間的に合成することでカラー再生を実現する。しかし、LCDは高価であり汎用的なシステムとはいえない。後者は、RGB3色の像を時間的に次々と再生し、残像効果を利用して合成する方式である。時分割でRGB3色のCGHを連続に表示するため、1枚のLCDでカラー再生を実現することができる。よって、時分割方式は3光源3LCD方式の3分の1のコストで済む。

しかし、どちらの方式を用いても、カラー再生には3枚のCGHを使用するため、単色再生と比較して3倍のCGH計算が必要となる。よって、電子ホログラフィのリアルタイムカラー再生は容易ではない。さらに、時分割方式では残像効果を使用するためにRGB3色のCGHを高速に表示することが必要であり、リアルタイムカラー再生は実現されていない。本研究では、取り扱いが容易で汎用性に優れたシステムを開発し、リアルタイムカラー電子ホログラフィを実現することを目的とする。

最初に、時分割方式によるリアルタイムカラー再生の実現を目指す。時分割方式では、高速にRGB3色の像を連続に再生するため、LCD上へのCGHの表示とそのCGHに対応した光源の色の切り替えを同期させる必要がある。そこで、光源に使用するワンチップRGB LEDの色を制御するUSBモジュールを開発した。これにより、光源の色をホストPC上のCPUで直接制御する事が可能となった。CPUからGPUへCGH計算及び表示の指示を出すことができるため、同期処理のプログラムを容易に開発することができる。また、垂直同期を使用してテアリング発生の抑止と同期処理を実現した。CGH計算にGPU(NVIDIA GeForce GTX TITAN)を1枚使用し、本システムを用いてリアルタイムカラー再生を行った。その結果、1色あたり約1,500点で構成される3次元物体のリアルタイムカラー再生に成功した。

しかし、3次元物体を構成する物体点数が多くなると、CGH計算時間が垂直同期の間隔を超えてしまい、同期が崩れてしまう。よって、物体点数の多い3次元物体をリアルタイムカラー再生するには、複数のGPUを用いた並列分散処理によるCGH計算の高速化が必要となる。そのため、カラー再生用マルチGPUクラスタシステムを開発を行った。本システムは、4台の計算用ノードと1台の表示用ノードで構成される。各計算用ノードには、GPU(NVIDIA GeForce GTX TITAN X)が3枚搭載され、各GPUが動画の1フレームにおける1色のCGH計算を行う。計算されたCGHは、ネットワークとしてInfiniBandを用いて表示用ノードへ転送される。表示用ノードは、転送されたCGHを垂直同期の間隔に合わせて次々と高速に表示する。本システムを用いて、物体点数の多い3次元物体のリアルタイムカラー再生を行った。LCD1枚の時分割方式のシステムにおいて、より精細に像を再生するために、光学系にレーザと液晶シャッターを使用した。GPU1枚のシステムと比較し、16倍以上の物体点数である1色あたり約21,000点で構成された3次元物体のカラー再生に成功した。また、マルチGPUクラスタシステムを用いて3光源3LCD方式のカラー再生も行った。その結果、1色あたり約21,000点で構成された3次元物体を38fpsでカラー再生に成功した。

# 時空間分割多重化法および並列分散処理システムによる リアルタイム電子ホログラフィに関する研究

応用理学コース 情報科学分野

庭瀬 裕章

ホログラフィは三次元物体からの光の波面を忠実に記録・再生できる唯一の技術である。電子化したホログラフィ (電子ホログラフィ) は「究極の立体テレビ」になると考えられている。コンピュータによって作られたホログラムを計算機合成ホログラム (CGH: Computer-generated hologram) という。電子ホログラフィは CGH を高精細ディスプレイに表示し、これに光を照射することで空中に三次元物体を再生する技術である。しかし、CGH 計算は膨大であるため、実用化には至っていない。

近年、GPU (Graphics processing unit) の浮動小数点数演算性能とコストパフォーマンスは著しく向上している。CGH 計算は使用するデータ量に比べ演算量が多く、並列化に向いている。このため、GPU を用いた電子ホログラフィの研究は盛んに行われている。

電子ホログラフィによる立体テレビを実現するためには、CGH を秒間 30 枚以上表示する必要がある。つまり、リアルタイムで CGH を再生するためには、三次元物体の座標データから 33 ミリ秒以内に計算して、CGH を作製し終えなければならない。複雑な構造をもつ三次元物体を点群で表現するには少なくとも数万点必要である。しかし、最新のハイエンド GPU を使用した場合でも、1 万点から構成される三次元物体の CGH 計算には約 40 ミリ秒かかる。したがって、CGH の計算高速化は重要である。

本研究は、電子ホログラフィによる三次元動画のリアルタイム再生を目的として、CGH の計算高速化技術を開発するものである。はじめに、1 つの GPU を使用して CGH を高速に計算する手法として時空間分割多重化法を開発した。数万点から構成される三次元物体を複数に分割し、分割された三次元物体に対して CGH 計算を行う。CGH によって再生された再生像は、元の三次元物体の一部であり、高速に計算することができる。高速に再生像を切り替えることで、残像効果により元の物体に近い像を再生することができる。本手法は、三次元物体の座標データに対して分割処理を行うだけでよいため、取り扱いが容易である。本手法により、1 枚の GPU ボード (GeForce GTX TITAN) を使用して、約 12,000 点から構成される三次元物体のリアルタイム再生 (秒間 30 枚以上) に成功した。

次に、複数の GPU を使用することができれば、さらなる高速化が期待できる。そこで、複数枚の GPU ボードを使用して CGH 計算の高速化手法の開発に着手した。本システムでは CGH 表示ノードと CGH 計算ノードから構成される。ノード間において、Gigabit Ethernet を使用して Full HD サイズの CGH を転送すると 60 ミリ秒程度かかり、リアルタイム再生は不可能である。この問題を解決するために、InfiniBand を使用して、CGH を高速に計算する手法を考案した。本手法は、パイプライン方式により複数フレームの CGH 計算を同時に行う。CGH 計算に 9 枚の GPU ボード (GeForce GTX 680) を使用して、約 25,000 点から構成される三次元物体のリアルタイム再生を実現した。また、本システムで最新のハイエンド GPU (GeForce GTX TITAN X) を 12 枚使用したところ、約 10 万点から構成される三次元物体のリアルタイム再生に成功した。さらに、実効速度約 40 TFLOPS を達成し、初代地球シミュレータ (2002 年) の理論性能と同等の実効性能が得られた。

最終的に、時空間分割多重化法とマルチ GPU クラスタシステムを組み合わせることで性能評価を行った。CGH 計算に GeForce GTX 680 を 9 枚使用した場合は、約 10 万点から構成される三次元物体のリアルタイム再生に成功した。また、GeForce GTX TITAN X を 12 枚使用した場合は、約 40 万点から構成される三次元物体のリアルタイム再生が実現できることを確認した。

# VLSI 高速化のための ECO 配置配線手法の研究

応用理学コース

情報科学分野

森本 裕介

情報化社会の進展により、大量のデータを処理するための高性能な電子機器が求められており、そのコア部品である VLSI の高性能化が求められている。

VLSI を高性能化するための設計改善法の一つとして、性能に関わる信号をレイアウト設計(配置配線設計)で配線長を短縮する方法がある。VLSI の性能は、処理時間によって決まる。従って、高性能化のためには、素子の処理時間と信号(ネット)の伝播時間を短縮すればよい。特に、信号伝播時間が最長の経路(クリティカルパス)に属する信号伝播時間の短縮が必要である。信号伝播時間は、レイアウト設計の配線長に比例する。従って、高性能化にはクリティカルパスの配線長を短くすればよい。

配置配線設計で配線長を短縮する方法の一つとして、レイアウトの部分改善法(ECO: Engineering Change Order)がある。従来の配線改善法や配置改善法(ECO 配線法や ECO 配置法)では、クリティカルパスのネットの再配線や素子の再配置により短い配線を目指していた。しかし、ECO 配線では、他のネットの端子や配線などが障害となり、配線が迂回して配線長が長くなり、VLSI の性能を劣化させてしまうことがある。また、ECO 配置では、クリティカルパス素子の配置は改善されるが、クリティカルパス以外のネットの配線長の増加を伴い、VLSI の性能を劣化させてしまうこともある。

本論文では、クリティカルパスの配線長を確実に短くする新 ECO 配線手法 MANGIRO, およびクリティカルパスの配線長を短くし、それ以外の配線長に影響が少ない新 ECO 配置手法 RIPPLE を提案する。

新 ECO 配線手法 MANGIRO は、最短経路から生成した配線領域内で経路探索することで、迂回のない最短経路に近い配線が得られる。すなわち、クリティカルパスのネットについて、最短経路を求め、その経路に幅をもたせた領域を生成し、層優先配線法(できる限り同じ層で配線する配線手法)によりその領域内で最短経路を求める。実験結果によれば、8bit マイコン 9 つにより配線長の削減効果を調べたところ、平均削減率は 2.16%~6.97%が確認できた。

新 ECO 配置手法 RIPPLE は、配置領域を小領域(bin)に分割してクリティカルパスの素子以外の再配置を制限することで、クリティカルパスの素子のみの配置改善により配線長を短縮し、その他の配線長が増加しない配置改善結果が得られる。すなわち、レイアウトの配置領域に均一な格子状の bin を設定し、クリティカルパスの素子を含む bin を ECO bin と定義し、ECO bin 内の素子の配置改善のみを行い、他の bin は対象としない。実験結果によれば、Dragon Placer(最先端の配置ツール)の配置結果に対して、配線長を平均して 5.7%~29.8%短縮し、他の配線長の増加は従来に比べ最大約 10 分の 1 に抑えることが確認できた。

以上より、本研究により、クリティカルパスの配線長を短縮することができ、かつクリティカルパス以外の配線長の増加量を抑える ECO 配置配線法を得ることができた。残された課題として、改善率を最大化し、処理時間を最短にする配線領域の幅、bin サイズの決定方法の研究が挙げられる。

# A Hybrid and a Time-Scalable Simulated Annealing based Solvers for Traveling Salesman Problem

応用理学コース 情報科学分野 楊成

There are a lot of combinatorial problems in information society today, such as vehicle routing, scheduling, transportation system and logistics system. They are solved by “global optimization” or “real-time optimization” methods.

Traveling salesman problem, TSP, is one of these combinatorial problems to search the shortest traveling route around many cities. It has commanded much attention of mathematicians and computer scientists specifically because it is so easy to describe the problem and so difficult to solve.

As a TSP solver, there is Simulated Annealing, SA. SA is a stochastic and probabilistic optimization method after the annealing analogy in the solid-state physics. SA uses randomly generated disturbance to search the solution space to avoid falling into local minimum solution. The solution that increases cost function value can be accepted probabilistically. It is known that the obtained solution by SA is the best one in quality; however, the final solution is distributed according to the optimization sequences, and it takes incredible long time to achieve it.

In this thesis, I propose a Hybrid SA based Solver, APE, to improve distribution problem and a Time-Scalable SA based Solvers, TAPE, to improve the time consuming problems.

APE, Annealing and Pair-wise Exchange Optimization, is integrated Pair-wise Exchange method (PW) with SA to save distribution of the solution. At the higher temperature APE uses normal SA, then switching a greedy method PW at the lower temperature. According to the experiments, it is found that APE can achieve better solution about 7 to 16% on average when with the switching temperature (TSW) is set 0.5. The study to find the TSW is a future work.

TAPE, a Time-scalable APE method, is to provide better solutions iteratively according to the time. TAPE re-anneals an SA solution at the lower temperature calculated by distribution of the cost function at the lowest temperature by APE. According to the experiments on TSP benchmarks show that the execution times of TAPE are shortened 17.1%, 21.2% on average than those of the SA. Furthermore TAPE achieves a better solution in quality than SA in every case; they are about 4.2%~29.8% better.

I expect proposed two new methods, APE and TAPE, can solve the solution distribution problem and the time consuming problems of SA, and the possibility of TAPE to apply “real-time optimization”.

## 簡易合成法と並列処理を用いた論理合成の高速化法

応用理学コース 情報科学分野 蘆荻 将大

近年、さまざまな製品にシステム LSI が用いられている。そして、ハードウェアの大規模化に伴い、回路の遅延時間や面積の大規模化が問題となっている。このような問題に伴い、論理合成の実行時間が増加するという問題が発生している。そこで、簡単なアルゴリズムで並列処理に向けた論理合成法を提案し高速に合成することを目指す。

本研究では、対象とする部分回路を取り出し、その入力と出力から真理値表を用い、ハミング距離が 1 になる部分をマージすることで最適化を行う。多出力の場合は共通な論理構造である回路を共有しゲート数を削減する。また、並列処理で並列化し合成することで高速に大規模回路全体の高速化を図った。

論理合成の評価基準として回路の面積としてゲート数を市販ツールと比較した。その結果、`decode16` や `encode16` などのランダムロジック系では市販ツールと同等の結果となった。しかしながら、`fadder8` や `alu` などの回路ではゲート数が増加したが、これらの回路については、あらかじめ手設計で最適化されたマクロ回路を部分回路として流用することで、合成の最適化が可能となることが見込まれる。

さらに、マルチコアを用い、4 並列、8 並列で高速化を図った。4 並列では最大 3.9 倍、最小で 2.8 倍、平均で 3.5 倍の高速化率を得た。また、8 並列では最大 7.7 倍、最小 3.7 倍、平均 6.0 倍の高速化率となった。

今後の課題として、省電力を考慮した方法や面積、タイミング、省電力の総合的に良い回路の生成方法などがあげられる。

## 教育用 8 ビットマイコンシステムの開発および

### ソフトウェアのプロファイリング技術の確立

応用理学コース 情報科学分野 岩河 秀知

現在、8 ビットマイコンを搭載した教育用 8 ビットマイコンボードはいくつか開発され商用化されているが、マイコン初学者の学習ツールとして開発されたものは少ない。本研究では、8 ビットマイコンを FPGA 上に実装し、一命令ごとにステップ実行を行い、その動作結果、内部状態値を確認できる初学者用の教育用マイコンを試作し、本マイコンの機械語命令コードを自動生成するための簡易アセンブラを開発した。FPGA マイコンとホスト PC 間の通信を行う通信ツールを開発したことで教育用 8 ビットマイコンシステムを開発した。さらに、本 FPGA マイコンの命令セットシミュレータ (ISS) を開発し、マイコン教育教材として多くの学生の利用を可能とした。

本 ISS の教育教材を情報科学コースの授業で学部 2 年生を対象に試行したところ、実習開始時のマイコンの理解度は 10 点満点中の約 3 点であったが、実習終了時の理解度は約 8 点に向上し、教育教材として効果が認められた。

近年、組込みソフトウェアが多数の分野で利用されている。しかしながら、これらのソフトウェアの内部や性能および再利用性などについてはその詳細が明示されていないものも多く、その再利用性についての判断が難しい。現在では、C 言語で記述されたソフトウェアの最適化のためにソフトウェアプロファイリング技術が開発され、一部のソフトウェアの性能解析に利用されているが、オブジェクトコードしか存在しないプログラムについてはその構造や性能の解析技術は未確立である。本研究ではオブジェクトコードを基本ブロック (Basic Block) に分割し、解析することにより、ソフトウェアの解析を行い、フローチャートを生成することで、プログラム構造や性能を確認できるプロファイリング手法を提案し、そのツールの試作を行った。

本手法の評価として、基本的な C プログラムおよび実用的なプログラムへ本手法を適用し、その有用性について評価した。解析の結果、各基本ブロックの全体における占有率が確認でき、ボトルネックを持つ基本ブロックの検出やソフトウェアの性能解析に効果が期待できることを示せた。

## 時系列画像からの知識発見支援システムの構築

### -オブジェクト情報の要約と可視化-

応用理学コース 情報科学分野 松永 知也

近年、気象衛星画像や監視カメラ映像などの時系列画像が大量に蓄積されるようになり、こうした大量の時系列画像から時空間変動に関する有用なパターンや知識を発見することが期待されるようになってきている。時系列画像には時間とともに形を変えながら移動する対象物-オブジェクト-が含まれることが多く、このオブジェクトの位置、形状、またオブジェクト間の相互作用等で、時空間の変動パターンを表現することができる。よって、本研究では時系列画像からの知識発見支援システムの構築を目指して、画像に含まれる不特定数・不特定形状のオブジェクトを抽出し、意味的ラベリングを行ったのち、オブジェクト情報としてデータベース化し、これに対してユーザが興味に応じてインタラクティブな検索と可視化を行うことができるシステムを構築した。

オブジェクト抽出では、閾値処理によってオブジェクト存在領域をサンプリングしたデータを、多変量正規分布の混合分布としてEMアルゴリズムでモデリングし、オブジェクトの位置、形状を各分布の平均値、分散共分散行列として求めた。また、最適な成分数は、複数の試行からベイズの情報量基準を用いて最小値を選択することで決定した(Honda et al., 2002)。さらに前の時間の解を成分数 $\pm 2$ の範囲で揺らぎをもたせて次の時間の初期値として最適解を求めることによって、時間的に連続なオブジェクトに同じラベルを付けつつオブジェクトの分裂・消滅等の現象を扱った(石津, 2008)。抽出したオブジェクトには画像の特徴量(FFTパワースペクトル)に対して自己組織化マップによるクラスタリングを行い、意味的ラベルを付加した。これらの情報を低レベルのスナップショット的オブジェクト情報とし、さらに時間とともに同一性を保ちながら生成、消滅の歴史を辿る真のオブジェクト、オブジェクトのファミリーといったより上位のデータモデルを作成してその情報を要約することによってオブジェクトとその変遷に着目したインタラクティブな検索に基づく発見が容易となるようにした。作成されたオブジェクト情報はPostgreSQLにてデータベースに格納し、PHPを用いてwebからのインタラクティブ検索、可視化が可能なシステムを構築した。

このシステムを2006年1年間にわたって3時間おきに取得された合計2920枚のMTSAT-7の気象画像に適用し、その結果を確認した。この結果、半自動的に14058個のオブジェクトが抽出され、7種類の意味的ラベルが付与された。構築した検索システムにおいてはユーザが興味に応じて時空間を絞り込んでオブジェクトベースの詳細検索ができることを確認した。このシステムを使用することによって、対象期間中に発生したオブジェクトの種類毎の発生頻度の推移の表示、ある時間に発生したオブジェクトを画像上にオーバーレイした可視化、オブジェクトとそのファミリーの分岐とその特徴の変遷を示す生命線の表示、空間的な軌跡の表示などが可能になった。特に台風などのオブジェクトの変化に対して、これまでの中心位置や気圧などのような基礎情報にとどまらず分裂などのより詳細なオブジェクトの変遷やオブジェクト同士の関連性を提供できるシステムが構築されたといえる。

# 学習コミュニティサイトとブラウザ拡張機能による Web 学習習慣化・促進支援

応用理学コース 情報科学分野

富田 大樹

現在, Web 上には無料で学習することができる学習コンテンツが数多く存在しており, Web ブラウザを使って学習を行うことができる. これらのコンテンツの中には書籍にも劣らない程内容が充実したコンテンツも多く, 他人が何かを学習する際に残してくれたメモのようなページですら, 役に立つことが多い. 本研究ではこのような Web ブラウザで Web 上の学習コンテンツを使って行う学習を Web 学習と呼ぶ.

Web ブラウザはパソコンだけでなくスマートフォン等の携帯端末にも搭載されているため, Web 学習はいつでもどこでも好きな時に自分のペースで学習できる利点がある. しかしながら, Web 学習には以下に示す 3 つの問題点が存在すると考えられる. 問題点(1): Web 上には膨大な量のコンテンツが存在しているため, 学びたいことがあり調べてみても, 同じようなコンテンツが複数存在していることがしばしばある. しかし, その中でどのコンテンツが良質なもののかな, 自分の学習の用途に適しているもののかなが判別しにくい. また, 見つけたコンテンツをどういう順序で学習すれば良いかの指標もない. 問題点(2): 学習を始めても, 学習コンテンツ群が充実したコンテンツの場合, 一度の学習で学習しきれないため複数回に分けて学習を行う必要がある. しかし, 計画的に学習を一定期間継続して行うことは困難であり, 一度学習から離れた学習者が再び学習へ復帰するとは限らない. 問題点(3): 学習コンテンツで学習中に, 意味の分からない単語を調べるため等の目的で一時的に学習中のコンテンツから離れるつもりが, そのまま本来するはずだったものとは違う学習をしてしまっている, ということも起こりがちである. したがって, Web 学習においては, 上記の問題点(2)を解決するために「学習行動を起こさせるための支援」が, 問題点(1),(3)を解決するために「学習行動を起こした後途中でやめないような質の高い学習を促す支援」がそれぞれ必要になると考えられる. 本研究では, 前者を「習慣化支援」, 後者を「促進支援」と呼んでいる.

これらの問題点の中で, まず問題点(2)と問題点(3)を解決することを目的としたブラウザ拡張機能の試作を行った. 試作したブラウザ拡張機能の評価実験を行ったところブラウザ拡張機能での支援は Web 学習においては有用そうだと分かったが, 「学習予定だったページが学習できず, 学習すべきページを溜め込んでしまった際の支援が必要」と課題も浮き彫りとなった.

本論文では, ブラウザ拡張機能だけでは支援できなかった問題点(1)を解決するための学習コミュニティサイトを提案し, 評価実験の結果も踏まえて改良を行ったブラウザ拡張機能と合わせて Web 学習の習慣化・促進支援環境として試作を行った. システム上で「バンドル」と呼ばれる学習コンテンツの「まとめ」を作成しこれを学習者同士で共有する. またバンドルの学習履歴を溜め込み, これを集合知として活用する. これらによって前述の試作ブラウザ拡張機能(以降, 旧システムと呼ぶ)ではできなかった, 集合知を活用した習慣化支援, 促進支援を行うことが可能になる. さらに旧システムの問題の解決策として, 学習が遅れているとシステムで自動的に学習予定を組み直すことで, 常に無理のないスケジュールを維持できるようにした.

本システムの有用性を評価するには, 多数の被験者に協力してもらい長期間システムを使ってもらう必要があるが, 本論文では小規模な評価実験で評価できる項目について評価した. 具体的には, 旧システムからの改善点である自動学習予定変更機能と, 他学習者の学習履歴を使用することが学習にどのような影響を与えるのかを検証し, 評価実験の結果について考察を行った.

## 視覚障害者のための白杖型歩行支援デバイスの開発 -視覚障害者によるデバイスの評価と機能の拡張-

応用理学コース 情報科学分野

篠原 克麻

現在、日本には約 31 万人の視覚障害者がおり、その半数以上が頻繁に外出している。しかし、視覚障害者は他の障害者と比較して外出頻度が落ちる傾向にある。これは後天的に視覚に障害が発生することが多く、これまで得られていた視覚情報が奪われ、外出が危険になった事によるものである。視覚障害者にとっての外出は危険そのもので、身を守りつつ歩行するため、様々な手段を用いて歩行する。主な外出の手段として、移動介護、盲導犬、白杖がある。それぞれには安全面、利便性、コストの面で利点、欠点が存在する。

当研究室では、視覚障害者の安全な歩行を支援する歩行支援システムの開発を行っている。歩行支援は危険回避とナビゲーションに分けられる。学部在籍時に、白杖に着目し、危険回避を目的とした白杖の範囲外の危険を早期に察知、通知する白杖型歩行支援デバイスの研究開発を同研究室の中内とグループで行った。当デバイスは白杖の範囲外に存在する障害物の認識、壁の認識、直進支援、それぞれの通知を行うことにより、安全な歩行を支援する。当コースに在籍する学生に目隠しをして、デバイスを用いての歩行実験を実施したところ、一定の有効性が認められた。

本研究の目的は、学部在籍時に開発した白杖型歩行支援デバイスを実際に視覚障害者に評価して頂き、その評価に即したデバイスの改良を行うことである。白杖型歩行支援デバイスの有効性を確認する予備実験、その予備実験で得られた知見を活かしデバイスの改良を行い、その改良の有効性を確認する評価実験を実施した。

予備実験では、デバイスの有効性に一定の評価が得られた。しかし、通知する情報の質の向上、段差認識の必要性が課題として浮き彫りになった。これらの課題に対してデバイスの改良を行った。改良点として、音声通知を自動化することにより、常に情報の取得を可能にした。「距離」と「対象物」を通知していたが、新たな通知内容として「方向」を追加することにより、通知対象物の位置をわかりやすくし、情報の質を向上させた。また直進支援では、回避方向を時計に見立てて通知することにより、直感的に回避方向がわかるようになった。そして新たな認識機能として、段差の認識、通知機能を実装した。この機能の実装により、視覚障害者が歩行の際、危険度の高い段差を認識できるようになった。また、障害物、壁、段差の認識が可能になったが、その中で歩行時最も危険である対象物を決定し通知する処理を追加した。これによりシーン毎に最も危険な対象物が通知され、歩行者の安全性が向上する。これらの改良が安全な歩行の支援に有効であるかを確認するため、再度視覚障害者の方にデバイスの評価を頂いた。

通知の内容・処理に大きな改良があったため通知に関する詳細な評価と、新たに追加した段差認識についての評価を頂いた。結果、予備実験時と比較して情報の質が向上し、良い評価を得ることができた。段差認識に関しても、有効性が確認できた。しかし、音声通知に関して、通知対象物が何もない時「なにもありません」と通知されるため、通知までのタイムラグの発生と何もない時の通知が歩行の妨げになっていた。そこで、これら2つの課題を解決するために通知対象物が存在しない時、「ピッ」という機械音で通知するようにした。これにより、タイムラグが減り、危険時は言葉で、安全であれば機械音でとメリハリが付き、歩行の妨げになる度合いが減少する。この改良に関しても、追加の評価実験を行い有効性を確認した。

今後の課題として、上り階段などの認識する対象物の追加、シーン毎に通知する情報量を変更する処理、デバイスのウェアラブル化、同研究室で開発しているナビゲーション機能を持つシステムとの統合が挙げられる。