

安心・安全な次世代モビリティを目指して

— 全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす —

佐藤 雄隆*、坂上 勝彦

全方向のカラー画像と三次元情報を同時かつリアルタイムで取得する能力を持つ「全方向ステレオカメラ」を電動車いすに搭載することにより、高齢者や障害者はもちろん、全ての人が安心して安全に、しかも最小限のエネルギー消費かつ低公害で、歩行者とも共存しながら移動可能とすることを旨とした新しい知的モビリティを提案する。

キーワード: モビリティ、アクティブセーフティ、福祉機器、画像処理、全方向ステレオカメラ

A secure and reliable next generation mobility

— An intelligent electric wheelchair with a stereo omni-directional camera system —

Yutaka Satoh* and Katsuhiko Sakaue

We propose a secure and reliable next generation smart electric wheelchair system that is equipped with a novel 3D stereo vision system referred to here as a 'stereo omni-directional camera'. The novel vision system is not only intended for use with a new generation of electric wheelchairs for conventional wheelchair users, but also for use in future advanced personal mobility devices for everyone.

Keywords: Mobility, active safety, welfare apparatus, computer vision, stereo omni-directional camera system

1 はじめに

高齢者や障害者の生活の質 (Quality of Life: QOL) 向上のための技術開発は社会的に重要な課題であり、先端的な科学技術の活用が望まれている。特に高齢化が急速に進んでいる我が国では、このような取り組みへの社会的な期待が大きい。

人間にとってモビリティ (自在に動けること、あるいはそのための手段) は不可欠な要素であり、特に「歩行能力」が失われると自らの意志での移動が極端に困難になり、日常生活に重大な困難を引き起こす。このような問題は高齢者や障害者のものだけではない。現在は問題なく歩行できる者であっても、交通事故や加齢などによって歩行困難となるリスクは誰もが持っている。すなわち、歩行能力が失われた場合の代替手段を十分に整備しておくことは、全ての者にとっての重要なセーフティネットとなる。

電動車いすは歩行能力の有効な代替手段である。近年急速にその普及が進み、歩行困難な者であっても自由に外出することが可能になりつつある。しかし一方で、その台数の増加に従って歩行者や障害物への衝突、段差や階段における転倒・転落などの事故が増加し深刻な問題となっ

ており、安全を確保するための技術開発が急務となっている。このような走行中の安全確保のための技術開発は、自動車において既に盛んに行われている。例えば、ミリ波レーダーやステレオカメラなどによって前方を監視し^[1]、追突の危険性を事前に予測して自動的にブレーキを制御するなどの技術が実用化されている^[2]。これに対し、電動車いすは道路を走行する自動車と異なり、人混みや室内など様々な生活空間で用いられるため、その安全の確保のためには次世代のセンシング技術を用いる必要があった。そこで我々は、全方向のカラー画像と三次元情報を全く死角なく同時かつリアルタイムで取得する能力を持つ「全方向ステレオカメラ」を搭載したインテリジェント電動車いすを開発した。この車いすは、室内外の空間において歩行者とも共存しながら安全に移動するために、障害物や段差などを全方向にわたって同時に検出し、危険が認められる場合には自動的に減速・停止する能力を基本機能として持ち、搭乗者の安心で安全な移動をサポートする。

本論文では、研究の出発点から試作機を構成するに至った過程について、戦略、シナリオ、工夫等の紹介を交えながら、可能な限り詳細に述べる。具体的にはまず、第2章

で研究シナリオについて述べる。第3章では、試作機を構成するにあたって必要となる要素技術の選択について述べ、第4章でその統合および構成について述べる。第5章では実験と評価について述べ、第6章で本論文をまとめる。

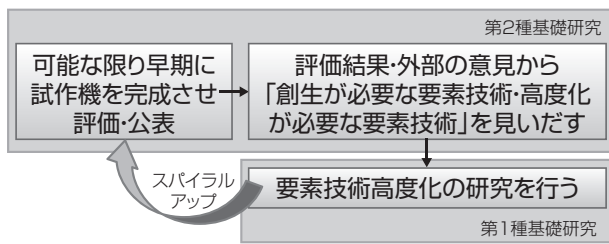
2 研究シナリオ

本研究は産総研と国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所が中核機関となって実施した文部科学省科学技術振興調整費「障害者の安全で快適な生活の支援技術の開発（平成16～18年度）」の一部として行われた。本研究のプロジェクト内での位置づけおよび責務は「future-orientedな先端技術による福祉機器高度化の可能性・必要性を提示する」であった。すなわち、製品の開発そのものではなく、先端技術が福祉機器にもたらす高度化の可能性について道標を示すことが要求された。その遂行のためには個別の要素技術についてだけでなく、それらを統合・構成したシステムとしてのコンセプトを論文、プレス発表^[3]、展示会などを通して社会へ情報発信することが特に重要になると考え、次のような研究戦略をとることとした（図1にモデル図を併せて示す）。

- (1) 可能な限り迅速に必要な要素技術の統合・構成を行うことで早期に試作機を完成させ、評価・公表を行う。
- (2) 評価結果および公表したことによって得られた外部からの意見を基に「創生が必要な要素技術、あるいは改良が必要な要素技術」を見いだす。
- (3) 要素技術の開発・改良に関する研究を行う。
- (4) (1)に戻る。

これまでの我々の研究パターンの多くは、まず要素技術の創生、高度化を行い、次にその展開を検討するというものであったが、この戦略は順序が逆となっている。これは、要素を統合・構成するという、いわゆる第2種基礎研究^[4]を起点として、必要な第1種基礎研究を連鎖的に創出する試みであると捉えることもできるだろう。

本研究ではまた、従来の「車いす」の枠組みのみに発想をとられることなく、健常者も利用する新たなパーソナルモビリティーとしての役割も視野に入れながら研究開発を



第2種基礎研究を起点として連鎖的に必要な第1種基礎研究を創出

図1 研究戦略モデル図

進めることにした。自動車のように多人数が乗車して道路を移動するのではなく、歩行者とも共存しながら1人で移動するための機器を開発することは、高齢者や障害者だけでなく、全ての人が最小限のエネルギー消費かつ低公害で移動するために重要である。また、より広いユーザーをターゲットとすることで、将来的により大きなマーケットの形成を狙うことが可能になり、高性能化・低コスト化、さらには新しいモビリティーの走行を前提としたインフラ整備などの恩恵を、現状の電動車いすのユーザーが結果として受けることができるようになると考えられるからである。

このような新しいモビリティーが室内外の空間において歩行者とも共存しながら安全に移動するためには、周囲環境を迅速かつ的確にセンシングする技術と、得られた情報からリスクを的確に検出する技術が重要となる。本研究では、全方向ステレオカメラおよび画像処理・認識技術群を電動車いすに投入することにより、歩行者や障害物への衝突、段差や階段などによる転倒・転落を未然に防止する機能を持ったモビリティーの実現を目指す。

3 要素の選択

研究目標を実現するために選択した要素技術群について述べる。なお、後の第4章で述べる要素の統合・構成を行った結果、必要なことが判明し追加選択された要素技術も含まれるが、個別にその旨を記すこととし、本章でまとめて紹介する。

図2に実際に選択した要素技術群を示す。電動車いすに対し(1)周囲の環境情報を取得するための「センシング技術」、(2)取得された環境情報から、走行環境における危険などを検出するための「認識技術」、(3)ユーザーに情報を提示するための「インターフェース」をそれぞれ投入することで、周囲の環境を積極的にセンシング・認識する機能を実現する。以下の節でそれぞれの要素技術について具体的に述べる。

3.1 全方向ステレオカメラ

全方向ステレオカメラ(SOS: Stereo Omni-directional System)^{[5][7]}は、筆者の佐藤らが科学技術振興機構岐阜県地域結集型共同研究事業 HOIP プロジェクトにおいて開



図2 要素の選択

発した、多数のカメラをボール状に集合させることにより、全方向のカラー画像と三次元情報を同時かつリアルタイムで取得する能力を実現した世界初の斬新なカメラシステムである。

広範囲の画像を取得するために、広角レンズや放物面ミラーなどを用いるカメラシステム^{[8]-[10]}が従来から提案されているが、単一のレンズと撮像素子によって広範囲を撮像するため、特にレンズの光学的な解像度が問題となり、得られる画像の解像度が十分でないという問題があった。これに対し、全方向ステレオカメラでは複数のカメラで分担して全方向を撮像するため、コストの低い一般的なレンズを用いたとしても全体としての解像度を高く保つことができる。また、カメラを複数持つため、カメラ間の視差を利用することで、三次元情報を容易に得ることができる。

図3左に全方向ステレオカメラの外観を示す。また、表1に主な仕様を示す。カメラが集合した部分をカメラヘッドと呼び、その基本形状は正十二面体である。三次元情報を計測するために正十二面体の各面にそれぞれカメラを3台ずつ配置しているが、カメラ間には視差を得るために適切な間隔（ステレオベースラインと呼ぶ。SOSでは50 mm）が必要であり、カメラヘッドのサイズが大きくなる問題がある。この問題を解決するために、図3右に示すように3台のカメラをT字型のアームにマウントし（このセットをステレオカメラユニットと呼ぶ）、正十二面体の各面が互いに交差し、かつ互いのカメラが互いの視野を遮らないよう三次元的に最適配置することで、50 mmのステレオベースラインを保ちつつ、カメラヘッドをこぶし大の直径116 mmにまで小型化している。カメラの総数は、3カメラ×12面=36カメラである。全てのカメラは同期しており、全く同一のタイミングで撮像する。

カメラヘッド部で取得した画像情報は1.25 Gbps×2本の光ファイバーでパソコン(PC)に転送する。PC上には36枚の画像が直列に並んだ形でメインメモリーにDMA(Direct Memory Access)転送され、ユーザーにはその先頭アドレスのポインタが通知される。このポインタを用い

ることで、転送された画像群に対して自由にアクセスすることができる。

なお、電動車いすに実際に搭載する予備実験を行った結果、走行中にカメラヘッド部に伝わる振動が想定していたよりも大きいことがわかり、カメラヘッド部の組み付け構造の強化と、撮像素子の変更を行った。初期型では通常のローリングシャッター方式（撮像管のように操作ラインごとにシャッターを切る方式。構造が簡単であるが、画像の上下で時間差が生じ、動きがある場合に微小な歪みを生じる）のCMOS撮像素子を採用していたが、振動のような激しい動きによって画像に微小な歪みを生じ、三次元計測精度に影響を及ぼすため、近年になって十分な性能を持つものが入手可能になったグローバルシャッター方式（画像全体で同時にシャッターを切る方式）のCMOS撮像素子を新たに採用した。

3.2 ステレオ画像処理

複数のカメラで撮影された画像の視差から、三角測量の原理で距離を求めることができる。人間が両目の視差を使って距離感を把握することに相当する。原理的には単純であるが、実装上難しい問題が主に2つある。

- (1) ステレオカメラの較正：距離を正確に測定するためには、焦点距離・レンズ中心・歪みなどのカメラパラメーターの実測値や、複数配置されたカメラの位置関係の実測値を正確に知る必要がある。
- (2) 対応点探索：複数のカメラによって撮影された画像間で類似性の高い点（すなわち、現実世界において同一であると推定される点）を対応付け、対応点間の距離を視差とする。カメラの近くに位置しているものは視差が大きくなり、遠方のものは視差が小さくなる。画像中の全画素に対して対応付けを行う必要があるため、処理コストが極めて大きい。

全方向ステレオカメラでは、(1)については製造時に一般的な較正手法によって全てのパラメーターを正確に求めている。また、製造以降、再調整は一切必要のないよう、カメラヘッド部を強固な構造としている。実際電動車いすに

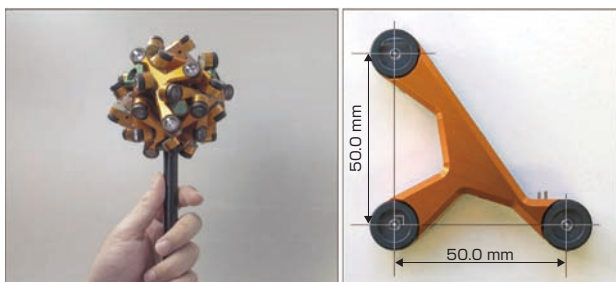


図3 全方向ステレオシステム
左がカメラヘッド部（直径116 mm）。右はステレオカメラユニット。
3つのカメラが同一平面上で直交するように配置されている。

表1 全方向ステレオシステムの主な仕様

ベース形状	正十二面体
撮像素子	1/4" CMOS（グローバルシャッター方式）
素子の解像度	640 (H)×480 (V) pixels
各カメラの焦点距離	1.9 mm
各カメラの画角	101° (H)×76° (V)
ステレオ基線長	50.0 mm
フレームレート	15 fps（カラー画像のみの場合は30 fps）
カメラヘッド直径	116 mm（外接円の直径）
重量	約480 g（カメラヘッドおよび支柱）
消費電力	約9 W（12 V、750 mA）

搭載した状態で3年以上使用したものであっても、これまで再調整を必要としていない。(2)については、処理コストが極めて大きいため、ハードウェア化する戦略も考えられたが、近年のPCの急速な高速化の流れを考慮し、敢えてソフトウェアで実装することを選択した。実際プロジェクト開始から3年程度で、純粋なPCの性能向上のみで約5倍程度ステレオ画像処理の計算速度が向上した。車載可能な小型PCに実装するためにはさらにソフトウェアの高速化も必要となったため、並列計算化、重複計算の徹底的な排除などを行い、さらに約2倍の高速化を実現した。

なお、ステレオ画像処理は、ミラーを用いるなどの工夫を行わない場合、最小2台のカメラ(2眼ステレオ)で実現できるが、それ以上のカメラを使用することで複数の結果を測定結果の信頼性評価に用いることができるようになり、精度の向上が期待できる。全方向ステレオカメラでは、精度とカメラヘッドサイズのバランスを考慮し、3眼ステレオを採用した。

3.3 画像統合

図4に画像統合の例を示す。全方向ステレオカメラは複数のカメラによって構成されており、個々のカメラの画像をソフトウェアによって統合することで、全方向画像を得る。今回のインテリジェント電動車いすでは、撮影した全方向画像を携帯電話回線などにより遠隔地に動画として送信し、遠隔サポートに役立てることも将来的な機能の1つとして検討している。このため、品質良く画像を統合する必要があるが、一方で同時に周囲環境の危険検知を高い頻

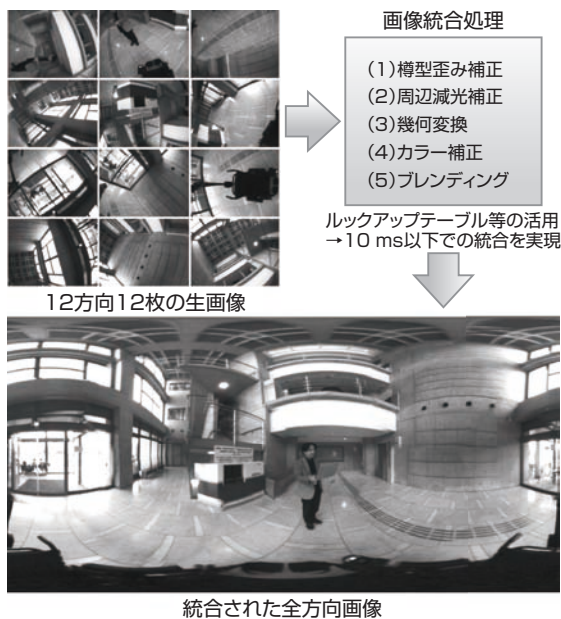


図4 高品質かつ高速な画像統合
レンズ歪みや周辺減光を含む12枚の生画像から全方向画像を高品質かつ高速に生成する。全方向画像を平面上に表現することは困難な課題であるが、ここでは世界地図と同様のメルカトル図法で示す。

度で行わなければならないため、計算コストは可能な限り小さくする必要があった。

一般的にカメラのレンズは、像の周辺部ほど歪みや減光が大きくなる(図5)。これらは通常のデジタルカメラのように1枚の画像を単独で鑑賞する目的であれば大きな問題とはならないが、複数の画像を統合する場合には、境界部にズレや明るさの差を生じてしまう。この問題を解決するために、(1)レンズの樽型歪みの補正、(2)レンズの周辺減光の補正、(3)個々のカメラ座標系から統一座標系への幾何変換、(4)カメラ間のカラーばらつき補正、(5)画像間の境界を滑らかに接続するためのブレンド処理を行う必要がある。紙面の都合で具体的な計算式については参考文献^[11]に譲るが、三角関数等を多く含む非線形変換となるため、そのまま実装すると1枚の画像合成に10数秒(3.2GHzのCPUを用いた場合)を要した。そこで、上記の計算に必要なパラメーターが、カメラヘッドやカメラ単体の特性に依存する定数であり、かつ予め全て測定可能であることに着目し、必要なパラメーターを予め全て決定したうえで計算結果をルックアップテーブル化した。これにより、歪みや色・明るさのムラを含む、補正の一切かかっている生のカラー画像群12枚から、良好に補正された1枚の全方向画像をテーブル引きのみで得ることができる。このとき、512×256画素の全方向画像を合成するために必要な時間は、わずか10ms以下である。

3.4 カメラヘッドの姿勢推定

電動車いす周囲の環境情報を正確に取得するためには、全方向ステレオカメラのカメラヘッドが電動車いすに対してどのような姿勢で取り付けられているのかを正確に知る必要がある。当初の設計では、カメラヘッドの取り付けが完了した時点で電動車いすを静止させ、カメラヘッドの支柱に固定した加速度センサーによって重力の方向を求めることでカメラヘッドの姿勢を得ていた。しかし、(1)走行中の走路の凹凸や段差などによるカメラヘッドの動揺が予想以上に激しかったことから、リアルタイムに姿勢を推定し補正することが必要となった、(2)電動車いすへの乗降にリフ



図5 レンズ歪み補正
人物が手に持っているのは直線定規である。左の補正前の画像では弓形に歪んでいることがわかる。右は補正処理を行ったものである。天井のライン等も歪みが補正されていることがわかる。

ター（搭乗者を吊り上げて電動車いすの座面付近まで運ぶ装置）を必要とする場合があることがわかり、カメラヘッドとリフターの干渉を避けるためにカメラヘッド取り付けアームをスイング可能な構造としたためスイングと固定を行うたびに取り付け姿勢が微妙に変化してしまう、という2つの問題が試作機のテスト時に判明し、リアルタイムにカメラの姿勢を推定する方法が必要になった。

姿勢推定を行うにあたっては、加速度センサーとジャイロスコープを用いる方法が定石であるが、相対的な姿勢推定であり、累積誤差が問題となる。そこで、全方向画像からカメラヘッドの姿勢を高速かつ絶対的に推定する方法を開発し、実装を行った^[11]。具体的にはまず全方向画像からエッジ（明度勾配の大きい部分）を全て取り出す。次に取り出された全てのエッジの方向を投票空間に投票すると、2つの大きなピークが得られる。これは我々の生活空間には鉛直と水平のエッジが多く存在しているためである。例えば机の天板や、天井と壁の境界線は水平のエッジを持ち、柱や本棚の支柱は鉛直のエッジを持つ。これらのピークの位置が投票空間上のどこに現れるかが相対的にカメラヘッドの姿勢を表していることになる。もちろん、鉛直に対して斜めに木が生える森があったとすると、その中では推定を誤ることになるが、ジャイロスコープと加速度センサーを併用することで、誤りが起こったことを知ることができる。

この手法についても、可能な限りルックアップテーブル化するなどの工夫を行い、わずか10 ms程度で、姿勢の推



図6 カメラヘッドの姿勢推定および傾き補正
全方向画像中の鉛直及び水平エッジからカメラヘッド自らの姿勢を推定する。上段は補正前の画像である。全方向画像なので傾きの影響がサインカーブ状に現れる。中央付近に写る黒い物体は電動車いす本体である。下段は推定したパラメーターを用いて補正した画像で、横方向が水平、縦方向が鉛直に対応するよう補正されている。

定および座標系の補正を可能にした。図6に、実際にカメラヘッドの姿勢を推定し、画像の補正を行った例を示す。図中上段は補正前の画像で、カメラヘッドが鉛直方向に対して傾いた状態で電動車いすに設置されているため、画像が歪んで見えることがわかる。図中下段は、上段の画像と全く同一のデータに対し、推定された姿勢パラメーターを用いて幾何変換を行ったものである。横方向が水平、縦方向が鉛直に対応する画像となっていることがわかる。カメラヘッドがどのような姿勢になったとしても、このような補正をリアルタイムで行うことができる。

3.5 危険検知

図7に全方向ステレオカメラによって取得した全方向距離情報を可視化した例を示す。正十二面体状に配置された各ステレオカメラユニットから得られた距離情報を座標変換し、カメラヘッドの中心を原点とする1つの統一座標系にマッピングしている。図7は1ショットで撮った同一のデータを3つの仮想視点から観測したものである。生データを直接プロットしているため、やや粗いものではあるが、人物や壁などまでの距離感が立体的に捉えられていることがわかる。全方向ステレオカメラでは、このような全方向距離情報を1秒間に15回（角度分解能360/512度＝約0.7度、1ショットで約30万点を計測の場合）取得することができる。電動車いす走行環境の危険検知は、この全方向距離情報を直接的に用いて行う。危険検知の詳細なアルゴリズムについては参考文献^[11]に譲るが、基本的には、床面の高さを0としたとき、-0.5 m（床より低い）から1.6 mの高さまでに存在する物体を全て検出する。このとき、検出された物体が実際に走行の障害となるかどうかは、電動車いすの進行方向に依存するため、図8に示すジョイスティックを倒す方向に応じて切り替わる判定エリアを設定し、減速・停止エリアに物体が入った場合にそれぞれ自動的に減速・停止する。本論文における実験では、判定エリアの直径はそれぞれ1.2 m（減速エリア）、0.4 m（停止エリア）とした。前進直進（F₀）では、狭い通路も通過可能となるよう、判定エリアを矩形としている。これに対し、前

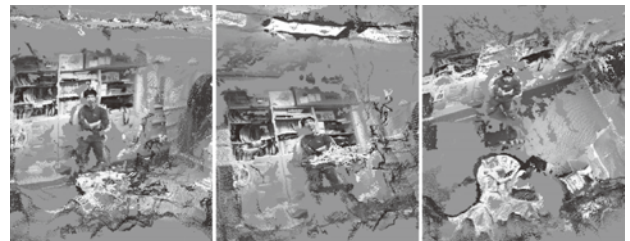


図7 全方向距離情報
同一のデータを3つの仮想視点から見たもの。観測点数は約30万点。このような全方向にわたる三次元データを1秒間に15回取得することができる。

進しつつ回転が加わる $F_{+1} \sim F_{+2}$ では、ユーザーのジョイスティック操作によって絶えず回転量が変化することが予想されるので、確率的な広がりやを考慮して扇形の判定エリアを設定している。回転量が大きくなる F_{+2} の例では、進行方向前方の障害物だけでなく、回転方向内側の巻き込みや、回転方向外側のはね飛ばしも考慮する必要があるため、回転方向内側に判定エリアを拡大すると同時に、進行方向反対側となる回転方向外側にも停止エリアを設けている。なお、障害物の観測・検出自体は、これらの判定エリアに関わらず、常に全方向に対して行っているため、急激なジョイスティック操作により急に判定エリアが切り替わったとしても、遅延なく危険の判定を行うことができる。さらに、床より低い領域も検出対象としているため、段差や下りの階段なども検出し、電動車いすの走破性能を超えると判断される場合には自動的に減速・停止させることができる。なお、段差は自動車や台車などの通過を考慮して角が削られている場合もあり、落差はあっても実際には通過可能である場合もある。しかし、現状では 5 cm を越える落差があると判定される場合は無条件で停止させる。これは、ステレオ画像処理による距離計測の誤差が条件によっては 2～3 cm のオーダーで出る場合があり、現状では、十分な安全余裕を持った判定ができないためである。なお、詳細は参考文献^[12]に譲るが、この問題を解決し、さらに高度で詳細な危険検出を実現するために、観測に近赤外パターン光を併用するステレオ画像処理システムの開発を別途進めており、数 mm のオーダーで段差を詳細に観測することに成功している。今後はこの技術の本システム

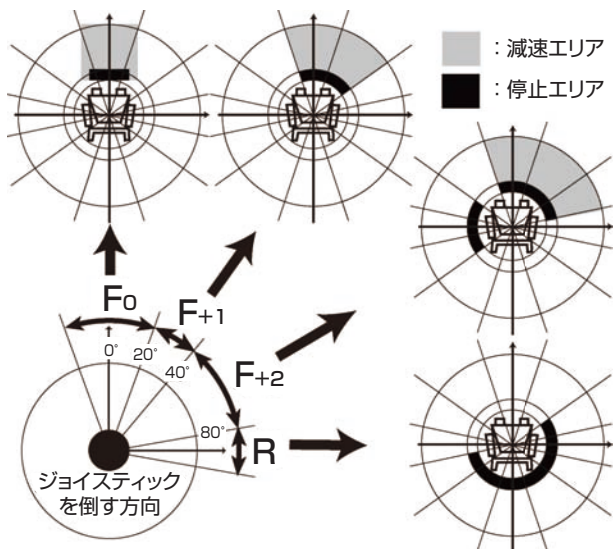


図8 判定エリアの制御
ジョイスティックの倒された方向によって判定エリアを切り替える。図は電動車いすおよびジョイスティックを真上から見たもので、上方向が前進方向、下方向が後退方向を表す。紙面の都合で前進直進 (F_0) ～右その場回転 (R) のみ示したが他の方向も同様に定義する。

への適用も検討する。

3.6 ジェスチャー検出

搭乗者の姿勢の変化やジェスチャーを全方向ステレオカメラによって三次元的に捉え、電動車いすのコントロールを行う機能を検討した。具体的には、(1) 乗車姿勢の異常を検知する機能、(2) 腕によるジェスチャーを検出する機能をそれぞれ実装した。これらはいずれも、搭乗者付近の空間を小立方体領域(ボクセル)に分割し、それぞれの領域内の物体の有無のパターンに基づいて認識を行う^[11]。乗車姿勢やジェスチャーの出し方については、搭乗者ごとに予め登録を行う。乗車姿勢の異常やジェスチャーの検出を行う際には、予め登録したパターンと観測されたパターンの類似性を基に判定を行う。具体的な動作については、5.1で詳しく述べる。なお、この機能は研究開始当初は設定されていなかったが、試作機完成後ユーザーからの要望により実装を検討したものである。

3.7 情報提示インターフェース

全方向ステレオカメラが危険を検知し、電動車いすが減速あるいは停止モードに入ったとき、搭乗者がその理由を理解できない場合に強い不快感を覚えることが試作機を用いた実験によって明らかになった。そこで、危険の検出状況を搭乗者に知らせるためのインターフェースの検討を行った。まず、情報提示のために小型の携帯情報端末を搭乗者の手元付近に設置し、次に情報提示方法の検討を行った。初期段階ではできるだけ多くの情報を搭乗者に伝えた方が良くと考え、危険が検出された方向・高さなどをグラフィカルに表示するものを試作してテストした。しかし、多くの情報が同時に表示されるため、走行中とっさに見て理解するのが困難であることがわかり、より直感的に理解できるよう工夫した。図9左に最終的に採用したものを示す。ここでは衝突や、段差からの転落などのリスクをわかりやすいピクトグラムで表現し、リスクが存在する方向に表示する。そして「STOP」、「Slowdown」などを大きな文字でコント

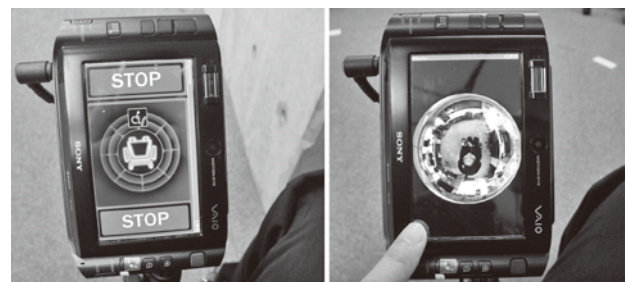


図9 情報提示インターフェース

左は電動車いすの制御状態を表示したものの。リスクの種類と存在する方向をピクトグラムで表示する。右は搭乗者を真下に見下ろす視点の全方向球面画像。タッチパネルで球を自由に回転させることができる。

ラストを高く表示することで、搭乗者が「どの方向にどのようなリスクがあって、現状どう制御が介入しているのか」を直感的に理解できるようにしている。

なお、この端末には全方向ステレオカメラによって取得した全方向画像を表示する機能も実装している。例えばバック時に後方を確認したり、自分を見下ろす視点で周囲を確認することもできる(図9右)。画面はタッチパネルになっており、指によるタッチ操作で好みの視点に調整できる。

4 要素の統合・構成

4.1 研究の具体的プロセス

研究プロセスの全体像について述べる。図10は図1で示した研究戦略モデル図に基づいて、研究のプロセスをより具体的に示したものであり、その流れは次のとおりである。(1) 中核となる「センシング機能」および「危険認識機能」を実現するための要素技術として、従来の研究シーズから全方向ステレオカメラ、ステレオ画像処理、画像統合処理、危険検知処理を初期選択した。(2) 要素技術の統合・構成を可能な限り短期間で行い、試作機を完成させることで研究・技術の可視化を行い、ユーザー・社会に向けて積極的に情報発信(論文のみならずプレスリリース、展示会なども通して)を行った。このとき、試作機のデザイン設計も情報発信の精度・効率を高めるために重要となる。(3) 評価のフェーズでは、実験・考察のみならず、外部の評価・ニーズ・知見の獲得にも注力することで、効率的に現状を評価する。これによって、改良が必要な要素技術、あるいは新規に開発することが必要な要素技術を見極める。(4) 要素技術の創生および改良に関する研究を行う。これはい

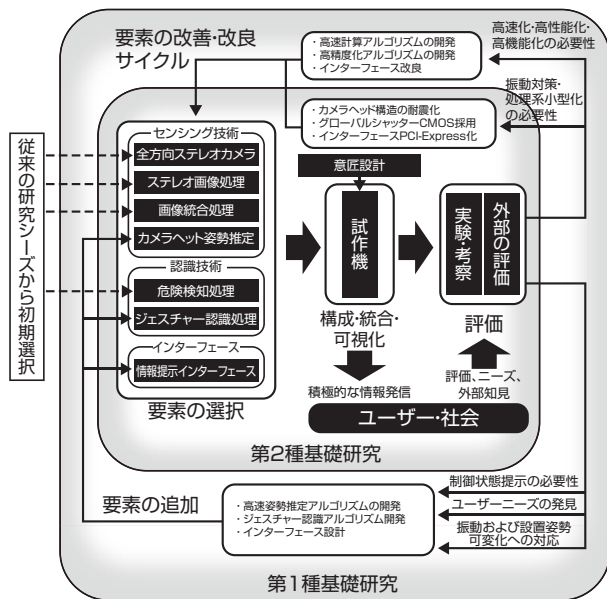


図10 研究の全体像

わゆる第1種基礎研究に相当するが、解決すべき課題および評価基準が明確であるため、効率的に研究を推進することができる。(5) 更新・追加された要素技術群を再び統合・構成し、以下同様のサイクルを繰り返す。

以上は、第2種基礎研究がエンジンとなって、第1種基礎研究を生み出し、再び第2種基礎研究に回帰することで、研究成果をスパイラルアップ的に継続して進化させる構造であると捉えることができるだろう。また、我々は当初、評価のフェーズにおけるユーザー・社会からのフィードバックは(研究の内容・方向性を調整する程度の)より抽象的・間接的なものであると想定していた。しかし、実際にはユーザーを巻き込んだ評価がダイレクトに要素技術を生み出す力となった。従来の我々の第1種基礎研究を起点とする研究アプローチでは実質的な重視がされてこなかったユーザーやサービスの層まで含んで第2種基礎研究のエンジンを構成し、そこからダイレクトに出てくる要素技術を生み出す力をもって第1種基礎研究を推進するという全体像がいわゆる「本格研究^[4]」の1つの実例となり得るのではないかと考える。

4.2 試作機の概要

第3章で述べた全ての要素技術を統合・構成した試作機の外観を図11に示す。この試作機は(1) 周囲の歩行者や障害物、段差や階段などを全方向にわたって同時に検出し、走行に危険がおよぶと判断される場合に自動的に減速・停止する機能、(2) 搭乗者のジェスチャーや乗車姿勢を認識し、介助を行う機能を基本機能として持つ。

全方向ステレオカメラは、アーム支持により、搭乗者の頭上前方に位置するよう設置した。この位置は人間が歩行するときの目の高さに相当し、生活空間における危険を検出するうえで合理的である。また人間が歩行する空間にお



図11 試作機の外観

全方向ステレオシステムはユーザーの頭上前方に設置した。PCや電源等の機器は全て車載され、外部ケーブルを全く必要とせず約4時間連続動作することができる。

いては、頭の高さより低いこの位置は障害物に干渉する可能性が少ない。さらに搭乗者の乗降動作の軌道外にアームおよびカメラヘッドが位置するよう設計しているため、そのまま乗降が可能である。リフター等を用いる場合でカメラヘッドの干渉が問題になるときは、アーム途中の折れ部がスイング可能となっており、カメラヘッド部を後方に逃がすことで対応することができる。

試作の初期段階では、大型のPCを外部に置き、外部電源とともにケーブルで電動車いすに接続し実験を行っていた。これを全て車載化するためには、前章で述べたステレオ画像処理、画像統合、カメラ姿勢推定・補正、危険検出、ジェスチャー検出、など極めて膨大な計算を要する機能を全て1台の小型PC上に実装する必要があった。これを実現するために、まず、第3章で述べた様々な高速計算アルゴリズムの開発・実装を積極的に進め、ソフトウェアの面からPCの小型化による処理能力低下を補った。また処理の並列化のほか、重複計算の排除、テーブル引きが可能なのは全てテーブル化する、などの実装上の工夫についても徹底的に行った。さらにハードウェアの面からは、小型のマザーボードに対応するため、全方向ステレオカメラのインターフェースをPCI-X規格からPCI-Express規格に変更した。PCI-X規格はデータ転送の帯域は広いが、サーバー用のマザーボードに採用が限られている。PCI-Express規格は近年急速に普及が進んでおりほとんど

のマザーボードで対応しているほか、全方向ステレオカメラのデータ転送に十分な帯域を確保することができる。

図12に車載されたPCの外観を示す。PCは座席後部のカバー内にコンパクトに収められている。この他、電動車いす-PC間のインターフェースユニット、ジョイスティックインターフェースユニット、無線LAN機器などを全てシート下に収めた。電源はモーター駆動用の鉛蓄電池(12V、52Ah×2)を全ての機器で共通に用いた。これにより、外部ケーブルを一切必要とせず、連続で約4時間動作することが可能である。

4.3 外装デザイン

研究シナリオに沿って「future-orientedな先端技術による福祉機器高度化の可能性・必要性を提示する」ものとするためには、人々の注目を集め、かつ一目でそのコンセプト・将来性が見てとれるものでなくてはならない。そのためには外装のデザインにも十分な注意を払う必要があり、チーム内で議論・試作を繰り返した。図13左に試作中の1コマを示す。同図中右は検討の結果決定した第1号機のデザインで、これを用いてプレスリリース^[3]や展示会出展、ニュース番組等でのデモンストレーションを行った(現在は車載機器等の小型化がさらに進み、図11で示したデザインの2



図12 PCの車載
右がカバーを外した状態。PCは座席後部に車載されている。

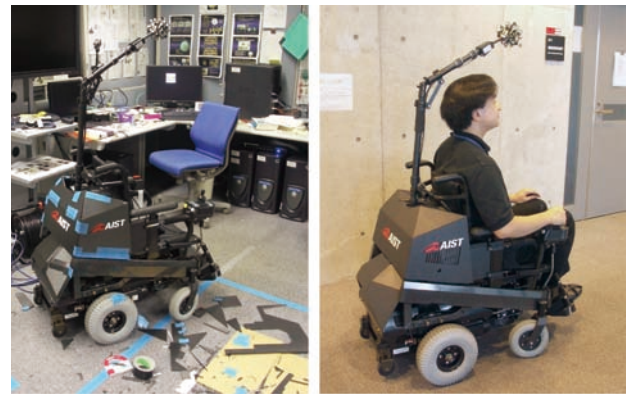


図13 外装デザインの検討
左はデザインの検討過程。何度も試作を繰り返しデザイン決定した。右は1号機のデザイン。これを用いてプレスリリースを行った。

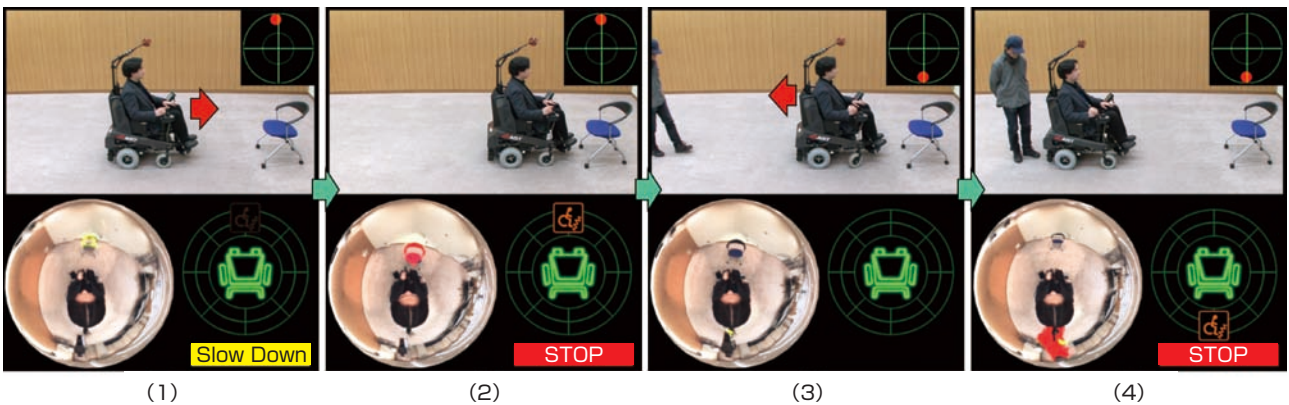


図14 障害物の検出

号機も同時に運用している）。

デザインのポイントは次のとおりである。(1) 内部の機材・配線は可能な限りカバーする。これらが剥き出しの状態を見せることは「研究室の実験に留まるレベルである」ということを取ってアピールすることに（結果的に）なり、今回のミッションには相応しくない。(2) デザインのセオリーを無視してカバーを無理に小型化しない。車載機器が小型であることをアピールしたいがために、カバーを無理に小型にデザインすると全体のまとまりが悪くなり、「余計な部分」としてむしろ目立つことになる。例えば、図13右の例では車載機器の占める体積は、カバーの体積の3分の1ほどである。しかし、全体としての一体感があるため「どこにコンピュータが入っているのですか？」といった質問を展示会等で多く受けるほどであった。(3) 産総研の取り組みであることを明示するためにAISTのロゴをデザインの一部として組み込んだ。

5 評価

5.1 試作機を用いた実験

図14に基本的な障害物検知実験の様子を示す。(1)～(4)まで時系列順に4コマのシーンを示す。それぞれ、右上に搭乗者が操作しているジョイスティックの方向（上方向が前進に相当）、左下に全方向ステレオカメラによって撮影した全方向画像（球面で表現：中央に搭乗者が映っている）、右下に第3章7節で紹介した情報提示インターフェースの画面を示す。(1)では前方の障害物（いす）に接近し、自動的に減速モードとなった。搭乗者が引き続きジョイスティックを前に倒し続けたため、障害物に衝突する直前の(2)で自動停止した。次に、(3)で搭乗者がジョイスティックを後方に倒し、後退を開始したが、搭乗者の視界の外となる後方から歩行者が接近しており、衝突の危険がある(4)で自動停止した。

図15は下り階段を検出し、自動停止する例である。路上の障害物だけでなく、段差や下り階段についても検出を



図15 下り階段の検出

下り階段や段差等を検出し、走行に危険がおよぶと判断される場合は自動的に減速・停止する。

行っているため、転落を未然に防止できる。

図16および図17に、ジェスチャー検出機能の動作例を示す。図16では、搭乗者の乗車姿勢が予め登録したものと大きく異なることが検出されたため、緊急停止を行っている。このような状態が設定された時間以上続く場合には、携帯電話などを介して外部に自動通知することができる。図17はジェスチャー検出機能と危険検出機能を同時に活用した例である。電動車いすから物を把握したり、エレベータのボタンなどを押すために対象に近づいたが、あと少しで手が届かない場合に、手を伸ばし続けるジェスチャーをトリガーとして、手が届く位置まで安全を確認しながら自動的に前進する。具体的には、(1)で搭乗者がペットボトルを把握するために腕を3秒以上伸ばし続けていると、(2)でアシストが始まり、電動車いすが自動的に微速前進する。腕を戻すか、障害物（ここでは机）と干渉する直前で自動停止するので、(3)で搭乗者はペットボトルを把握することに成功した。

これらのジェスチャー認識機能は、第3章6節で既に述べたとおり、現状ではボクセルによって粗く量子化した三次元形状のパターンを予め登録したパターンと単純に比較することによって姿勢やジェスチャーを判定しており、図16や図17の例のような比較的大きな動作を検出の対象としている。一方で、腕に障害を持つ一部のユーザーからは「肩の微妙な動きをジェスチャーとして認識できないか」といった要望も出ており、今後は学習型のパターン認識手法を導入することで、より細かな動きを正確に認識する手法の開発を検討する予定である。

なお、図17の機能は実際の車いすユーザーから要望があり、実現に向けて検討を行ったものである。電動車いすはジョイスティックによる微妙な位置決めが熟練を要する。特に物を把握するために机に近づいたり、エレベータのボタンを押すために壁に近づくケースでは、操作の間違いによって机や壁に衝突する可能性があり、大きなリスクを伴う。このような問題を避けるため、微妙な位置決めが必要な場合には介助者の手を借りるケースもあるのだが、同様の介助が1日に数10回、数100回と必要になるため、むしろ電動車いすの搭乗者が「申し訳ない」と感じ、ひいては外出を差し控えることにもつながる場合がある。このような些細だが回数の多い介助こそ機械がサポートしてくれないか?という当事者の要望を受けて検討を行った。

以上が試作機における基本機能であるが、さらに発展的にいくつかの機能を実装し、検討を行った。図18では最も近くにいる人物を認識し、常に人物に対して正対、かつ1mの距離を保つように自動追尾している。全方向を同時に監視しているため、人物が急な移動を行ったとしても

見失うことはない。今後これを発展させ、特定の人物（介助者など）を自動的に追跡する機能の実現を検討している。図19は人混みにおける経路の自動選択を想定した実験である。同図中(2)で多数の人物に囲まれてしまったが、全方向を同時に観測しているため、進行可能な方向を瞬時に判断し(4)で自動的に脱出している。人混みにおいては、常に周囲の状況が動的に変化するので、情報収集に時間を要していると、その間に状態が変化してしまう。全方向ステレオカメラは1ショットで全方向の情報を同時に収集することができるので、このような人混みにおいても全方向にわたって常に最新の情報を用いて制御することが可能である。なお、これらの機能は試作機のセンシング能力をわかりやすく表しているのここで紹介したが、他の「ユーザーを補助する」機能と異なり、電動車いすが自動的に動く。このため、より確実な安全性が求められ、実用化へのハードルは高いと考えられる。しかし、これらのような自動化技術へのニーズは高く、将来へ向けた発展的な機能として研究を進めている。

図20に様々な環境下における実験の様子を示す。家具などが複雑に配置された室内空間や、太陽光の直射を受ける屋外空間など、多様な環境において走行実験を行い、安定性を評価した。実験の過程で「安全」と「自由」のバランスが大きな課題となった。極論するとユーザーのジョイスティックの操作にかかわらず停止モードとする（すなわち全く動かない）ことが、ある意味最も「安全」である。逆に安全システムの介入を減らしていくと、より「自由」に動く

図20に様々な環境下における実験の様子を示す。家具などが複雑に配置された室内空間や、太陽光の直射を受ける屋外空間など、多様な環境において走行実験を行い、安定性を評価した。実験の過程で「安全」と「自由」のバランスが大きな課題となった。極論するとユーザーのジョイスティックの操作にかかわらず停止モードとする（すなわち全く動かない）ことが、ある意味最も「安全」である。逆に安全システムの介入を減らしていくと、より「自由」に動く

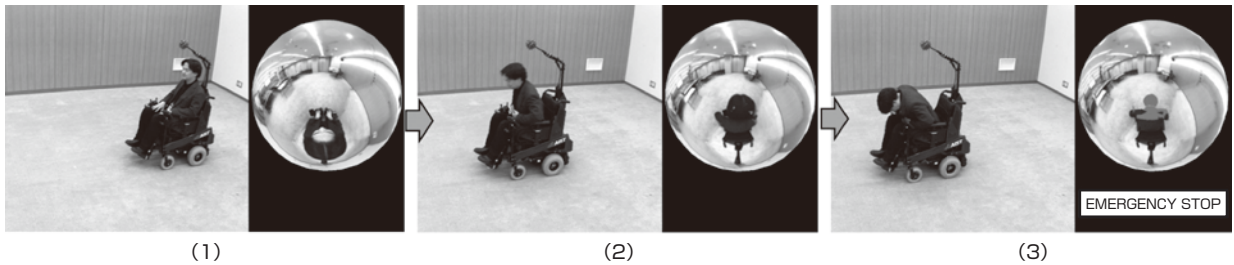


図16 搭乗者の乗車姿勢の異常を検知して緊急停止

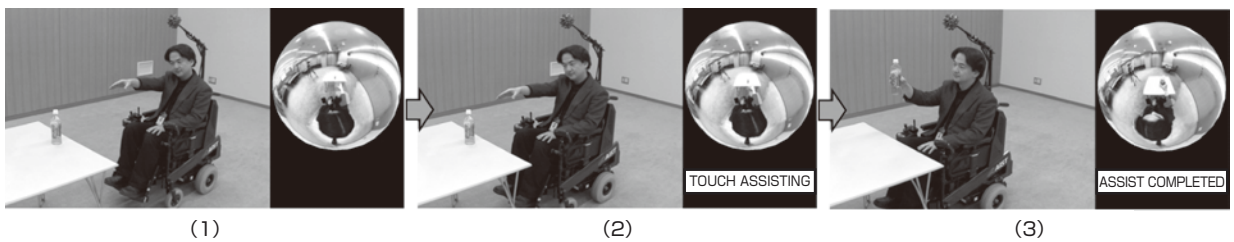


図17 搭乗者のジェスチャーを認識して手の届く位置まで自動的に介助



図18 自動追尾実験

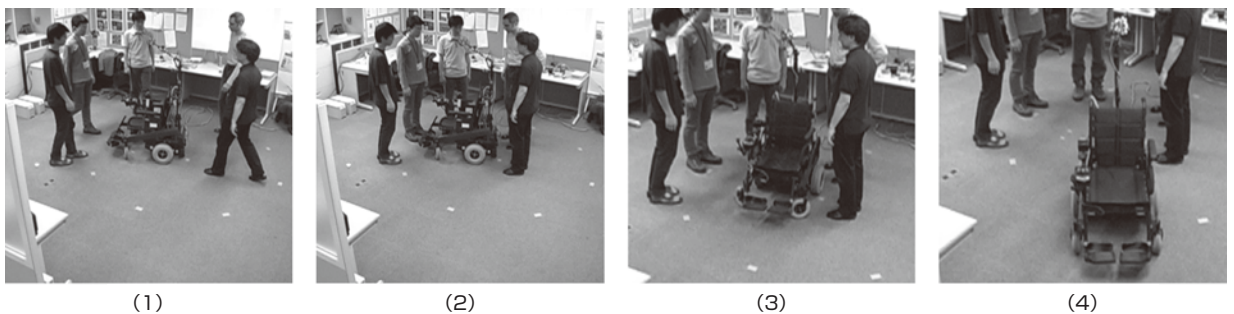


図19 人混みにおける自動経路選択

ことができるようになるが、走行のリスクは高まる。この設定については、ユーザーのスキルや身体の状態、あるいは単純な好みによって、適切な設定がかなり異なることがわかった。この問題について今後より具体的に議論を進めるためには、先に述べた自動化の問題も含めて、安全性をある程度定量的に評価するための枠組み作りが必要であると考えられる。また、万が一事故が起こった場合の責任の所在に関しても十分に議論を進めていく必要がある。これについては、例えば自動車の運転補助・自動駐車機能や生活支援ロボットなども全く同じ問題を持っている。今後これらの分野とも連携しながら、安全と責任に関する枠組み作りを進め、社会的なコンセンサスを得ていく必要があるだろう。

5.2 ユーザーの反応

本研究の研究シナリオにおいては、実際に様々なユーザーの意見を収集し、取り入れていくことがスパイラルアップのために重要となる。このため、特に従来の車いすユーザーの意見を収集するために国際福祉機器展（総来場者数は3日間で約10万人）など多くの展示会に出展を行った。当初は「かなり未来志向の提案であり、従来の車いすユーザーに相手にしてもらえないのではないか」といった不安があったが、実際には全くの逆で「このようなものを待っていた、すぐにでも欲しい」、「このような研究をさらに積極的に進めて欲しい」といった感想を多く得ることができた。東京での展示にもかかわらず、わざわざ大阪から車いすで来場された方もいた。先端技術を活用した支援システムに対する強いニーズがそこには存在したのである。来場者からは様々な意見が得られ、新たな研究課題を生み出した。既に紹介したように図17の自動介助機能などはこの過程で生まれたものである。

福祉機器は、それ単独ではユーザー層が限られることや、対象者の状態によってカスタマイズが必要になることが多いため、一般の大量生産機器と比較するとビジネスとして成立させることが難しい。このため、切実なニーズがありな



図20 様々な環境下における実験

屋内外、多様な環境下での走行実験を実施。左は狭い通路の通過実験。車幅に対してほとんど余裕がないため、安全寄りに設定すると頻繁に自動停止してしまうなど「安全」と「自由」のバランスが難しい。右は屋外の直射日光下における実験。様々な環境変動に対する安定性を評価している。

がらも先端的技術の導入が進まない現状がある。しかし本来はこのようなニーズにこそIT技術やロボット技術が積極的に活用されるべきであり、今後の状況の改善に向けた何らかのスキームを検討する必要がある。そのような意味で、従来の車いすの枠組みに限定するのではなく、新しいモビリティとして発展的に考えるというコンセプトに対して従来の車いすユーザーからも多くの賛同と期待をいただいた。また、本研究で開発した要素技術群の一部を、マーケットの大きい自動車産業における安全確保技術として一旦応用展開し、高性能・低コスト化した技術を再び電動車いすに持ち帰り適用するというスキームも検討できるだろう。

6 まとめと今後の展望

全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いすの開発について述べた。冒頭で述べたとおり、まず従来の研究シーズから初期選択した要素技術を統合・構成し、可能な限り早期に「動く」試作機を完成させることで研究・技術を可視化した。そしてその評価・公表の結果から「創生が必要な要素技術、あるいは改良が必要な要素技術」を見極め、要素技術研究を遂行し、その結果を再度統合・構成するというスパイラルアップ構造の研究戦略を実践した。そこにおいては、必要な要素技術研究が連鎖的に生み出されたが、それらはいずれも直ちに必要とされているものであり、かつ性能の評価基準も明確（発生している問題を解決できるかどうか）であったので、良い効率とバランスで研究を進めることができた。

本研究では、室内外の空間において歩行者とも共存しながら安全に移動するためのモビリティを実現するために必要となる周囲環境を迅速かつ的確にセンシングする技術と、得られた情報からリスクを的確に検出する技術の開発を行い、電動車いすに実装し実証実験を行った。今後全ての人を対象とした新しいモビリティとして更に発展させるためには、インフラの整備や法規・法令の問題など課題も多く存在しており、今後引き続き検討を進めていく。

参考文献

- [1] H. H. Meinel: Commercial applications of millimeterwaves: History, present status and future trends, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 43 (7), 1639-53 (1995).
- [2] 下村倫子, 中村 聡, 後藤敏行, 藤本和己, 室 英夫: 車載カメラとレーザレーダフュージョンによる前方車両追跡, *電気学会論文誌C*, 123(8), 1427-1438 (2003).
- [3] 全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす -安心・安全な電動車いすの実現-, 産総研プレスリリース (2006).
- [4] 第2種基礎研究を軸とした本格研究の展開, 第1集~第13集, 産業技術総合研究所 (2006-2008).

- [5] 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典: 実環境センシングのための全方向ステレオシステム(SOS), *電気学会論文誌C*, 121-C (5), 876-881 (2001).
- [6] 佐藤雄隆, 山本和彦, 桑島茂純, 棚橋英樹, 王 彩華, 丹羽義典: 移動体ビジョンを指向した小型全方向ステレオシステム(miniSOS)の開発, *画像センシングシンポジウム(SSII03)講演論文集*, 311-316 (2003).
- [7] S. Shimizu, K. Yamamoto, C. Wang, Y. Satoh, H. Tanahashi and Y. Niwa: Moving object detection by mobile Stereo Omni-directional System (SOS) using spherical depth image, *Pattern Analysis & Applications* (2005).
- [8] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji: Real-time omnidirectional image sensor (COPIS) for vision-guided navigation, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 10(1), 11-22 (1994).
- [9] J. Kurata, K. T. V. Grattan and H. Uchiyama: Navigation system for a mobile robot with a visual sensor using a fish-eye lens, *Review of Scientific Instruments*, 69, Issue 2, 585-590 (1998).
- [10] C. Mandel, K. Huebner and T. Vierhuff: Towards an autonomous wheelchair: Cognitive aspects in service robotics, *Proc. Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS2005)*, 165-172 (2005).
- [11] Y. Satoh and K. Sakaue: An omni-directional stereo vision-based smart wheelchair, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2007, Article ID 87646, 11 (2007).
- [12] 佐藤雄隆, 尾崎竜史, 坂上勝彦: 近赤外パターン光投影ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす, *信学技報(PRMU2008-106)*, 108 (263), 103-106 (2008).

執筆者略歴

佐藤 雄隆(さとう ゆたか)

2001年北海道大学工学研究科博士後期課程修了。財団法人ソフピアアジア HOIP プロジェクト主任専門研究員を経て、現在、産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員。前職で全方向ステレオカメラを開発。産総研に入所後、その障害者支援への応用に関する研究を進めている。他にロバストパターンマッチングに関する研究を行っており、これまで監視カメラによる人物の自動検出アルゴリズムの製品化などを行った。筑波大学大学院准教授(連携大学院)。博士(工学)。本論文では、研究計画、システム的设计・実装、実験・考察に関する部分を担当した。



坂上 勝彦(さかうえ かつひこ)

1981年東京大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年電子技術総合研究所に入所。以来、一貫して画像処理とその実世界応用に関する研究に従事。RWC(リアルワールドコンピューティング)プロジェクト実世界知能技術分野の研究開発や障害者の安全で快適な生活の支援技術の開発等のプロジェクトに参画。現在、産業技術総合研究所情報技術研究部門主幹研究員。筑波大学大学院システム情報工学研究科教授(連携大学院)。1979年度電子通信学会学術奨励賞、1985年度情報処理学会論文賞、2006年 IAPR(国際パターン認識連盟) Fellow。工学博士。本論文では、研究戦略に関する検討および全体の総括を担当した。



査読者との議論

議論1 ゴールの設定とそれへのシナリオについて

質問・コメント(赤松 幹之:産総研人間福祉医工学研究部門)

表題に明記されているように、本研究開発は電動車いすに限定するものではなく、新しいパーソナルモビリティをゴールと設定したと第2章で述べられています。しかしながら、第3章以降に記載されているシナリオや技術は車いすへの適用という観点からしか説明がなされていません。要素の統合によって得られる機能の中で、新しいパーソナルモビリティを意識したものが何であったかを明記してください。

質問・コメント(内藤 耕:産総研サービス工学研究センター)

この論文で提示されている技術群は、電動車いす以外への発展の可能性が高く、そのことは表題のみならず、第2章でも記述されています。一方、論文はこの電動車いすの試作機(プロトタイプ)開発を軸に、第1種基礎研究として、さまざまな要素技術の開発とその統合プロセス、評価結果が記述されています。この研究成果の普及に伴い形成されるこれからのパーソナルモビリティ社会像や、そこへのシナリオ、必要な技術課題等についての提案を追加してください。

回答(佐藤 雄隆)

ご指摘のとおり、要素の統合によって得られる機能の中で、何が新しいパーソナルモビリティを意識したものであったか明確になっておりませんでしたので、1章および2章に、室内外の空間において歩行者とも共存しながら走行する電動車いす程度のスケールのモビリティを想定している旨、そしてそこにおいては、歩行者や障害物への衝突、段差や階段における転倒・転落などを未然に防止するための「周囲環境を迅速かつ的確にセンシングし、得られた情報からリスクを的確に検出する機能」が重要となる旨を追加しました。

本研究は基本的には電動車いすの高度化に関するものであったため、「高齢者や障害者のQOL向上」は常に外すことができない重要なテーマで、本論文全体の文脈もそれに沿ったものになっております。その一方で、「電動車いすはモーター移動台車にイすを取り付け、乗車可能にしたものである」と技術的にシンプルに捉えれば、従来の電動車いすの概念を一旦リセットして新しいパーソナルモビリティとしての役割を発展的に検討できる可能性があり(そのために外装のデザインもできるだけ従来の車いすと異なった新しい形に見えるよう設定しました)、そしてそれがより広い層をユーザーとして取り込むことにつながり、結果として電動車いすの市場規模の問題を解決する方向に向かってくれればベストである、という思いを同じ文脈の中に混在させたことが問題であったかと思えます。

なお、この考え自体は研究のカウンターパートである国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所の研究者の方やユーザーの皆様からも一定の賛同を得ることができましたので、第5章2節に記述を追加しました。一方で、その実現に向けては電動車いすに準ずる移動体に安全技術を投入しただけでは不十分で、インフラの整備や法規・法令の問題など解決すべき課題が山積である旨も第6章に追加しました。

議論2 研究課題の設定の図式化について

質問・コメント(赤松 幹之)

スパイラルアップ型の研究戦略をとり、試作と評価のプロセスを経ながら、要素技術を設定して統合していくという第2種基礎研究のアプローチをとっています。具体的な内容は本文中に書かれていますが、読者がこの研究プロセスを理解しやすいように、研究課題設定のプロセスを図示してください。例えば、最初の段階で構想した必要な要素技術は何で、それはそれぞれどういう問題があると想定して設定したのか。そして、試作のプロセスや試作品の評価によって明らかになった技術課題は何だったのか、それぞれはどういう観点からの課題だったのか(例えば、耐久性、精度不足、新たに発見されたユーザーニーズ、実環境の耐用性への対応等)などがわかるようにブロック図的な図で表現することを検討してみてください。また、「まとめ」

に、このスパイラルアップの方法をとったことに関する考察（良かった点や改善すべき点など）を加えてください。

質問・コメント（内藤 耕）

研究のスタイルは、プロトタイプ開発を通じて技術を可視化し、必要な外部知見を効率的に導入することで、研究成果が継続的に進化していく方法論が採用されています。この研究方法論によって、応用的に見える研究（第2種基礎研究）から、さまざまな基礎科学研究（第1種基礎研究）がドライブされていることを、自ら実証しています。これは研究マネージメント上の重要な発見で、第3章において、どのような知見をもとに、どのような第1種基礎研究がドライブされたかを、各要素技術の記述を構造化することで、その流れを明確化できます。記述方法の再構築と第3章の最後にそれを表として整理をお願いします。

回答（佐藤 雄隆）

研究の具体的なプロセスを整理した図10を追加いたしました。また、同図に関する説明を第4章1節として追加いたしました。具体的な説明につきましては第4章1節のとおりですが、図10の構造は第2種基礎研究がエンジンとなって活発に第1種基礎研究を生み出し、その第1種基礎研究によって創生および性能・価値が上がった要素技術によって更にレベルの高い第2種基礎研究を行う、という「価値を増幅させるサイクル」が実現されています。しかも、第1種基礎研究において研究を行う要素技術はいずれも直ちに必要とされているものであるため出口が明らかで、かつ性能の評価基準も明確（発生している問題を解決できるかどうか）であるので、研究のバランス・効率がとても良かったと考えています。これに関する記述を整理して第6章に記述しました。

また、当初我々は評価のフェーズからのフィードバックは、研究の内容・方向性を調整する程度の間接的で抽象的なものになると考えていました。しかし、実際にはユーザーなどを巻き込んだ評価がダイレクトに要素技術を生み出す力となりました。これは我々にとって新しい発見であり、図10中にそのプロセスを表現いたしました。従来の我々の第1種基礎研究を起点とする研究アプローチでは実質的に重視されてこなかったユーザーやサービスの層まで含んで第2種基礎研究のエンジンを構成し、そこからダイレクトに出てくる要素技術を生み出す力をもって第1種基礎研究を推進するという全体像が本格研究の1つの実例となり得るのではないかと考えています。

議論3 実現した各機能について

質問・コメント（赤松 幹之）

実現した代表的機能として、障害物検知、下り坂検知、姿勢異常の検知、ジェスチャー検知、自動追尾、自動経路選択の5つを紹介していますが、これらの機能を発揮する状況の説明が必ずしも明確ではないようです。ユーザーの状態として脇見をしていることを想定しているのか、また障害の程度を想定した機能なのか、また車いすの事故分析に基づくものなのか、など研究開発のゴール設定の説明が望まれます。

回答（佐藤 雄隆）

ご指摘のとおり各機能の選定理由および目的が明確ではありませんでしたので、第1章、第2章、第3章冒頭、図2、および第4章2節にそれぞれ記述を追加しました。ユーザーとして想定する対象は健康者も含む全ての人ですが、歩行者とも共存しながら安全に走行することを検討するにあたって、「周囲環境を迅速かつ的確にセンシングし、得られた情報からリスクを的確に検出する機能」が必須であると考え、障害物検知および段差の検知を第一に実装いたしました。

更に、高齢者や障害者を対象とした情報収集を行ったところ、ジェスチャー認識機能に対するニーズがあることを発見し、同機能をスパイラルアップ・サイクルの過程で実装しました（これについて第3章6節に記述しました）。自動追尾、自動経路選択の機能につきましては、将来的な自動移動に向けた発展的な取り組みとして研究を行っています。試作機のセンシング能力をわかりやすく表しているため、本文中

で紹介しましたが、その位置づけが明示されていませんでしたので、第5章1節に記述を追加しました。

議論4 他の自動化技術との関連について

質問・コメント（赤松 幹之）

第5章1節の終りに安全と自由の議論がありますが、自動車のITS分野では自動運転の実路実験が行われた10年前に議論が多くなされました。自動車の場合には加害性が高いため、事故が起きた場合の責任を誰がとるかが議論のポイントでした。結局、完全自動運転で事故が起きた場合にはメーカーが責任を取るようになる可能性があることから、ドライバーの意志の元での運転支援技術とする方向になりました。すなわち、基本的に必ずドライバーが関与した状態にしており、ドライバーが発現した行動に対するアシスト技術として社会に導入していくという戦略がとられています。そして、アシスト技術が普及する過程で、システムの信頼性や機能の高度化が進められ、そのプロセスで自動化が受け入れられる社会が形成できれば自動化システムが導入されていくかもしれません。一方、センシング技術を中心とした運転支援システムとしては、衝突警報システムが市場導入され始めています。ここでは、ユーザーインターフェースのデザイン（センシングした状況をいかに正しく、かつ迅速にユーザーに伝達するか）と、警報システムに対する過信の問題（警報が出ることに安心して脇見を多くするようになる等）が議論されています。このようにITS分野では、安全と自由の問題は、制御においてはシステムとユーザーとの役割分担、センシングにおいてはユーザーインターフェースのデザインと過信の問題として議論されています。

この研究開発はセンシング技術が基盤となっていますが、上述のように、ユーザー自身による制御とシステムによる制御のバランスをどうするかが社会導入へのポイントになると考えられます。この点についてのお考えがあれば書いていただきたく思います。

回答（佐藤 雄隆）

たいへん悩ましい問題ですが、ご指摘のITSでの流れが的確に状況を表していると思います。我々としては、システムの信頼性や機能の高度化を進めることで、自動化が受け入れられる社会の形成を目指すこととなります。残念ながら現状で具体的な案が固まっているわけではありませんが、その過程では安全性を評価するための枠組みを、同様の問題を持つ自動車や生活支援ロボットの分野とも連携しながら積極的に形成していく取り組みが必要であると考えます。これに関して第5章1節後半に記述しました。

議論5 リスクを的確に検出する技術について

質問・コメント（赤松 幹之）

リスク検知を重要な技術課題として挙げられていますが、実際には第5章1節に書かれているように、ユーザーのリスク認知に合致したリスク判定は極めて難しいもので、今後の研究開発が不可欠です。その意味からすると第3章5節の「危険検知」は物体検知（凹みも含めて）のレベルの技術の説明になっていると思います。危険度の判定、制御を減速とするか停止とするかの判定などの記述が必要と思います。

回答（佐藤 雄隆）

ご指摘のように、リスクを的確に検出する技術について記述が不十分でしたので、第3章5節に記述を追加するとともに図8を新たに追加しました。また、段差の詳細な分析に関しては、現状のシステムでは精度の問題で困難であること、また、その問題を解決するために近赤外パターン光を用いるステレオ画像処理システムの開発を別途進めている旨と、その参考文献を新たに追加しました。

議論6 ジェスチャー検出について

質問・コメント（赤松 幹之）

ジェスチャー検出についての記述がやや簡単で、その適用範囲が

明確にはなっていません。ジェスチャーや乗車姿勢のセンシングおよび判定についてももう少し詳しい説明をお願いします。

回答（佐藤 雄隆）

ご指摘のとおりジェスチャーに関する記述が不足していましたので、第3章6節 および第5章1節に記述を追加しました。具体的には、現状実装しているのは(1)乗車姿勢の異常を検知する機能、

(2)腕によるジェスチャーを検出する機能である旨、また、それぞれ現状では量子化した三次元パターンの単純なマッチングによってジェ

スチャーを判定しているのです、ある程度大きな動作を前提としている旨、を追加しました。実は、ジェスチャー認識は、障害によって体の一部しか動かすことができない方からも期待が寄せられています。具体的には、肩だけわずかに動くという方のジェスチャーを認識できないか、という話があり検討を行っていますが、現状の比較的大きな動作を前提とする場合と異なり、通常の動作とジェスチャーの動作の判別が困難であるため、現状の単純なマッチングでは不十分で、学習型のパターンマッチング手法などを導入することを検討しています。これについても記述を追加しました。