

障害者自立支援機器等研究開発プロジェクト

安全に配慮された電動車いす

平成21年度 総括研究報告書

研究代表者 佐藤 雄隆

平成 22 (2010) 年 3 月

## 目 次

A. 研究開発目的.....	1
佐藤 雄隆	
B. 研究開発方法.....	2
佐藤 雄隆	
C. 研究開発結果.....	3
1. 障害物・段差等危険回避技術.....	3
松本 治, 後藤 茂樹, 本間 敬子, 加茂 光広	
2. 段差踏破技術.....	7
松本 治, 後藤 茂樹, 本間 敬子, 加茂 光広	
3. 直進走行技術.....	9
松本 治, 後藤 茂樹, 本間 敬子, 加茂 光広	
4. 対人衝突回避技術.....	12
佐藤 雄隆, 坂上 勝彦	
5. 対人協調走行技術.....	17
佐藤 雄隆, 坂上 勝彦	
D. 被験者実験結果.....	19
井上 剛伸, 硯川 潤	
E. ユーザからのヒヤリング及び現地調査.....	22
佐藤 雄隆	
F. 電動車いす安全研究会.....	22
井上 剛伸, 硯川 潤	
G. 実用化に向けて今後残された課題.....	27
佐藤 雄隆	
H. 結論.....	28
佐藤 雄隆	
I. 研究発表（発表予定）.....	29
J. 知的財産権の出願・登録状況.....	29

障害者自立支援機器等研究開発プロジェクト  
統括研究報告書

安全に配慮された電動車いす

研究代表者 佐藤 雄隆  
(独) 産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員

研究要旨

本研究開発は、社会的な問題となっている電動車いすの安全をテーマとし、技術開発の立場から解決策を提案しようとするものである。電動車いすは、障害者の自立移動を促進する有効な福祉機器であると同時に、事故などによる危険を伴う機器でもある。本研究開発では、電動車いすの操作者に起因する危険性を軽減するとともに、機械側が安全性の多くを担うことで自立移動の可能性を広げることを目指し、①障害物・段差等危険回避技術、②段差踏破技術、③直進走行技術、④対人衝突回避技術、⑤対人協調走行技術、の各技術の開発を行い、研究期間内にこれらの機能を実装した試作機を開発したうえでユーザによる実証試験を行った。実証実験では、本研究開発の有用性を定量的に実証すると同時に、アンケート調査でも、本研究開発で開発した技術がユーザの安全安心向上に寄与することが示唆された。また、i) 習熟を考慮した開発・評価手法が必要であること、ii) 安全制御における各種パラメータの最適化が必要であることなど、今後の課題についても明確にされた。本研究開発ではまた、当該技術に関するステークホルダ（利用者、企業、医療専門職、福祉機器専門家、技術開発専門家等）を集め、研究会形式でその実用化・普及にむけた課題の抽出もあわせて行った。

研究分担者

松本 治 (独) 産業技術総合研究所知能システム研究部門, グループリーダー

坂上勝彦 (独) 産業技術総合研究所情報技術研究部門, グループリーダー

本間敬子 (独) 産業技術総合研究所知能システム研究部門, 主任研究員

後藤茂樹 アイシン精機(株)ライフ&アメニティ技術部, グループマネージャ

井上剛伸 国立障害者リハビリテーションセンター研究所福祉機器開発部, 部長

研究協力者

加茂光広 アイシン精機(株)ライフ&アメニティ技術部 チームリーダー

硯川 潤 国立障害者リハビリテーションセンター研究所福祉機器開発部, 研究員

A. 研究開発目的

電動車いすは、障害者の自立移動を促進する有効な福祉機器であるが、近年その台数の増加に従って、歩行者や障害物への衝突や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いる。

日本では高齢化に伴って、電動車いすの出荷台数は年々増加しており[A1]、図 A-1 に示すように 2008 年度までの累計出荷台数は約 53 万台である。製品評価技術基盤機構に 1985 年 5 月から 2008 年 1 月末までに寄せられた事故情報は 96 件である（製品事故のみ。交通事故は含まない）。事故の内訳は図 A-2 のとおりであり、転落、転倒、踏切での事故が 64%を占めている。また、

図 A-3 より事故の原因は、操作ミスが 25% を占めている。さらに事故の詳細として、道路の路肩から用水路に約 1.7m 下の用水路に転落し、電動車いすの下敷きとなり死亡。ビルの正面入口に設置してある段差板を直角に進行したところ、前輪が浮き上がり、気がついたら床に倒れる、その際、頭と上腕にケガを負った、などが報告されている [A2]。

電動車いすの事故原因を大別すると、車いす自体の破損や故障に起因するもの、誤操作や判断ミスなど操作者に起因するものが挙げられる。また一方で、電動車いすの安全は、操作者のスキルにより確保されている部分も多く、適合や訓練の要因も重要なポイントとなる。本研究開発では、電動車いすの操作者に起因する危険性を軽減する（下記①、④に対応）とともに、機械側が安全性の多くを担うことで自立移動の可能性を拡げる（下記②、③、⑤に対応）ことを目指す。

そのために、全方向ステレオカメラ、レーザレンジセンサ、加速度計、ジャイロ等の各種センサを用いた転倒・転落・衝突回避機能等を電動車いすに付加し、指定課題に対応した、

- ①障害物・段差等危険回避技術
- ②段差踏破技術
- ③直進走行技術
- ④対人衝突回避技術
- ⑤対人協調走行技術

をそれぞれ実現する。研究期間内にこれらの機能を実装した試作機を開発し、ユーザによる実証試験を行う。

一方、電動車いすの安全は、技術のみでは解決できない課題が多く存在し、安全装置の製品化には、他の製品にはない高いリ

スクがあるため、企業としてのモチベーションにつながらないという意見もある。本研究開発では、当該技術に関係するステークホルダ（利用者、企業、医療専門職、福祉機器専門家、技術開発専門家等）を集め、研究会形式でその実用化・普及にむけた課題の抽出もあわせて行う。

## B. 研究開発方法

本研究開発では、電動車いすの安全確保のために必要となる環境認識および運動制御技術に関する高度で先端的な技術力を有する産総研、および電動車いすの販売実績を持ち、新技術の実用化に関する知見を有するアイシン精機、そして、想定される支援機器ユーザに関する深い知識を有する国リハ研究所がそれぞれ密接に連携することで、プロジェクトを効率的に推進する研究開発体制をとった。具体的には、産総研は指定課題に対応した機能をそれぞれ実現するために、全方向の画像と距離情報を死角なく取得する能力を持つ「全方向ステレオカメラ」や、ミラーを併用することで水平面と垂直面を同時に検知できるレーザレンジセンサなどのセンサ群、そして姿勢センサを用いた段差踏破補助や片流れ防止機能のアルゴリズムおよび制御法に関する研究・開発を行いつつ、アイシン精機と密接に連携しながら、試作機的设计・調整にあたった。アイシン精機は、電動車いすの本体設計および各動作部の設計・試験を中心に担当し、前述の産総研で開発した技術を産総研と連携しながら試作機としてまとめ上げた。更に、想定される支援機器ユーザに関する深い知識を有する国リハ研究所が、ユーザによる機器評価や安全技術普及に関する総合的な検討などを分担する体制をとった。

以上のように、本研究開発においては、研

究分担者が独立した分担テーマを遂行するのではなく、密接な連携のもとに研究開発を効率的に推進する体制をとったため、本研究報告書もそれに基づき、分担研究報告書の形式をとらず、総括研究報告書として全体を順序立てて記述する形式とした。なお、各章ごとの文責者は目次に記載した。

#### (倫理面への配慮)

実証試験にあたっては、まず試作機に想定される危険源を特定し、その対策を講じるとともに、事前に開発者による走行試験を行うことで安全性を確認した。また、実証試験のエンドポイント、想定される不利益や危険性について事前にチェックを行い、その対策について十分検討した。個人データの管理は、実証実験責任者が一括して行い、保管場所の施錠等、漏洩の無いよう十分な配慮を行った。収集したデータについても匿名化した上で管理を行った。

産総研内では健常者の方を対象とした被験者実験のみを行い、国リハ研究所では歩行に障害がある方を対象とした被験者実験を行った。このため、それぞれに対応した産総研用(資料 B-1 参照)と国リハ研究所用(資料 B-2 参照)の説明書および同意書を作成した(実際の説明書には実験責任者の詳細な連絡先および実験に従事する者全ての情報が記載されているが、資料 B-1 および B-2 では省略している)。実証試験に関する事項は、これらの説明書による書面説明を行い、同意書による同意を得たうえで実施した。

また、以上の倫理面への配慮の妥当性については、実証試験を実施する国リハ研究所および産総研において、それぞれ倫理審査委員会に諮り、多重のチェックを受けた。以上のことから、倫理面の問題は発生しなかったと判断している。

## C. 研究開発結果

本研究開発では、開発した機能を検証するために、先行試作機、プロトタイプ機、成果機を開発した。図 C-1 に、先行試作機、プロトタイプ機および成果機の外観を示す(主な仕様を表 C-1 に示す)。簡易型電動車いすをベースとして開発した車体に、片流れ防止用の各種センサ(加速度計、レートジャイロ)、段差安定踏破用の電磁ブレーキ付き受動転倒防止バー、下り階段・段差検知用のレーザレンジセンサ、全方向ステレオカメラなどを搭載することができる。

以下、開発した各機能の詳細について述べる。

### 1. 障害物・段差等危険回避技術

屋内外の舗装された水平な路面の高さ 5cm 以上の上り・下り段差を対象に、上り・下り段差や下り階段からの転落回避技術を構築した。まず始めに、外界センサにより段差までの距離を検出する手法を示し、次に検出結果に基づいて段差を旋回して避ける手法を示す。提案手法の有効性を検証するために、本技術を簡易型電動車いすに実装し行った、段差回避実験を示す。段差を検知するためのセンサとしては、距離測位センサであるレーザレンジファインダ(以下、LRF)を用いた。

この機能を用いることにより、段差等による転倒・転落事故のリスクを軽減することが出来る。なお、障害物の回避については 4. で併せて述べる。

#### 1. 1 ミラー付き LRF

本研究開発で使用した LRF は、不可視(近赤外線)レーザで水平面状の空間の一定角度範囲(270 度)をスキャンし、物体までの距

離と角度を得られるものである。使用した LRF は図 C-1-1 に示す Rapid-URG (北陽電機(株) 製, UBG-04LX-F01) である。表 C-1-1 に仕様を示す。この LRF に図 C-1-2 のように鏡を取り付けることで、レーザの照射方向を変える。以降、これをミラー付き LRF と呼ぶ。このミラーによりレーザ光が反射することにより、1 台の LRF で水平一面、垂直二面の三面をスキャンすることが可能となる [C1]。

ミラー付き LRF で得られる距離データには図 C-1-3 のように水平方向のデータと垂直方向のデータの両方が含まれる。表 C-1-2 に、反時計周りでのインデックスと LRF の前方 (図 C-1-3 では上方向) を  $0^\circ$  としたときの角度範囲、データの種類を示す。

図 C-1-2 のミラー付き LRF は、底面が鉛直となるように車いす前方に設置する。測距範囲は図 C-1-4、図 C-1-5 となり、前方は  $116^\circ$ 、垂直方向は水平を  $0^\circ$  すると  $-43^\circ \sim 5^\circ$  の  $60^\circ$  である。両サイドの垂直方向スキャン用のミラーはレーザが外側に  $9^\circ$  向くように曲げてある。約 80cm 前方の壁面にミラー付き LRF を正対させてスキャンし座標変換した例を図 C-1-6 に示す。原点が LRF の中心、X-Y 平面が地面、 $y = 800$  あたりの X-Z 平面が壁面である。

ミラー付き LRF を 2 台、図 C-1-7 のように車いすの前方左右に  $9^\circ$  外側に向けて取り付ける。左右垂直方向のスキャン範囲は  $9^\circ$  外側に向いているため、最も外側のスキャン範囲は  $18^\circ$  外側に向き、中央の二スキャン範囲は前方を向く。外側へ向けることで段差が車いすと平行に存在しても段差に接近していれば検知することが可能となる。本研究開発で使用した車いすに取り付けたときの寸法は

$A =$  約 23cm,  $B =$  約 45cm,  $h =$  約 50cm であった。

## 1. 2 段差検知手法

本研究開発では、前述のように、屋内外の舗装された水平な路面の高さ 5cm 以上の上り・下り段差を対象とする。さらに、植え込みなどの検知可能性についても検証する。

### 1. 2. 1 下り階段検知

本研究開発で使用している LRF である北陽電機(株) 製 URG シリーズは最大計測距離以上のデータはエラーとなる。下り階段に接近した場合、図 C-1-8 のようにエラーが連続して発生する。以降、このような連続したエラー群をエラーエリアと呼ぶ。垂直スキャンのエラーエリアが一定数以上のエラーから成り立っている場合、そこは地面がない場所 (階段のような大きな下り段差) である可能性が高い。

図 C-1-9 は、エラーデータが連続した数に応じた階段までの距離を示す。計測に使った階段の寸法は、一段の高さ (蹴上げ寸法) が 17cm, 一段の奥行 (踏み面寸法) が 27cm, 12 段である。約 1m 手前でエラー連続数が 20 であった。

図 C-1-10 はエラーエリアを示した図である。線が放射状に右下端から伸びており、短い線分がエラーでないデータ、長い線分がエラーのデータである。このような誤認識によりエラーではない部分が混ざりエラーエリアが分断される場合がある。そこで、エラーエリアを特定した後、近接したエラーエリア同士をマージすることで、誤認識によるエラーエリアの分断を防ぐ。図 C-1-11 は、連続していないエラーが発生するごとにエラーエリア

データを作成し、作成した後エラーが連続している間エラーエリアの範囲を広げていくことで、エラーエリアを特定するためのアルゴリズムである。図 C-1-12 は、エラーエリア間がマージ閾値以下ならエラーエリア同士を結合させ一つのエラーエリアにして、分断されたエラーエリアをマージするためのアルゴリズムである。これらのアルゴリズムにより図 C-1-10 のエラーエリアをマージしたものを図 C-1-13 に示す。

### 1. 2. 2 下り階段検知

下り段差をミラー付き LRF でスキャンすると、図 C-1-14 のように車いすのある段差上の地面と段差下の地面が得られる。そこで、段差上の地面の端を求めることで段差までの距離を求める。下り段差検知アルゴリズムを図 C-1-15 に示す。具体的には、図 C-1-16 のように、 $N$  個の連続した点データが内包できる高さを持つボックスを作る。 $N = s_1; s_2$  の二つのボックスを手前側から一点ずつ走査させ、二ボックス内の平均  $y$  座標  $y_j$  の差が  $H_{min}$  以上の所を段差と検知する。ただし、一定数の点データをボックスに収めるための  $y$  方向の高さが  $D$  未満であるときのみ段差と判断する。図 C-1-16 は、 $s_1 = s_2 = 3$  のボックスで走査した場合を示す。box1 は走査開始時のボックスの位置で、このときは  $y_j$  の差が  $H_{min}$  未満なので段差と判断しない。box2 は二つのボックスが段差の上下に別れたときである。このとき  $y_j$  の差が  $H_{min}$  以上となり段差と判断する。box3 は  $s_1 = 3$  個の点を収めるためのボックス高さが  $D$  以上なので段差ではないと判断する。

車道と歩道の間約 15cm の下り段差を計測した結果を表 C-1-3、図 C-1-17～図

C-1-19 に示す。パラメータは  $H_{min} = 50\text{mm}$ ,  $s_1 = s_2 = 3$ ,  $D = 30\text{mm}$  とした。図中の点群中の直方体が検知した段差の位置と高さを示す。常に左右両方で検知できるわけではないが、段差の位置と高さを正しく検知していることが分かる。

### 1. 2. 3 上り段差検知

上り段差や上り階段、壁面はいずれも図 C-1-20 のように、鉛直方向に連続してスキャンされる。よって、鉛直方向に連続している点群を検出し点群中で最も LRF に近い点を段差までの距離とする。

エラーエリアを特定するアルゴリズムと同じような手法で連続して鉛直方向に伸びている座標データ群（上り段差）を見つけ出し、少ない要素数の上り段差の削除、上り段差のマージを行う。その手法を図 C-1-21 に示す。ただし、削除やマージはエラーエリアの場合と同様であるため省略する。図 C-1-22 は、 $dx_{max} = 15\text{mm}$ ,  $dy_{min} = 2\text{mm}$ , 最低要素数 20, 最低上り段差高さ 150mm, マージ閾値 5 で実際の壁に対して検出を行った結果である。上方向に並んだ点群が実際の壁であり、点群中の長方形が検出した壁である。長方形の幅は  $dx_{max}$  である。実際の壁の点群に長方形が重なっており、正しく壁を検出していることが分かる。

歩道の脇に植えられた図 C-1-23 のような四角く刈られた植え込みに向かって車いすを配置して計測をした。検知結果を表 C-1-4、図 C-1-24、図 C-1-25 に示す。植え込みは上り段差として検知されることが望ましいが、ほとんど検知されることはなかった。これは植え込みをスキャンしたときの各点のばらつきが大きいためである。上り段差として検知

させるには、前後方向のばらつきに対応するために  $dx_{max}$  の値を上げる必要がある。また、マージ前の不要データ削除で、いくつかに分断された上り段差データが削除されないように、 $H_{min}$  と  $N_{min}$  を下げる必要がある。以上より、 $dx_{max} = 50\text{mm}$ 、 $dy_{min} = 3\text{mm}$ 、最低要素数 10、最低上り段差高さ 150mm、マージ閾値 5 とパラメータを変更した。その結果を表 C-1-5、図 C-1-26、図 C-1-27 に示す。どちらも植え込みを上り段差として検知した。

### 1. 3 段差回避手法

前述の段差検知手法により段差までの距離  $L[\text{m}]$  が求められる。車いすに搭載されているエンコーダにより左右の車輪の角速度  $\omega_L$ 、 $\omega_R[\text{rad/s}]$  を求め、車速  $v = r(\omega_L + \omega_R)/2[\text{m/s}]$  が求められる。ただし、 $r$  は車輪の半径  $[\text{m}]$  である。車いすが速度  $v$  で走行し続けて段差に衝突するまでの時間  $t_c$  は  $t_c = L/v$  で求められる。段差までの距離が遠い場合には緩やかに旋回し、近い場合には速やかに旋回するために、求めた衝突時間に反比例させた旋回速度で車いすに回避行動をとらせる。

ミラー付き LRF は車いすに二台搭載しているので最大四点で段差を検知できる。各点で検知したかどうかの組み合わせは全部で 16 パターンあり、各パターンごとの回避行動を定める。パターンと回避行動の対応表を表 C-1-6 に示す。LL, LR, RL, RR は、スキャンしている場所を示し、LL は左の LRF の左の垂直面, LR は左の LRF の右の垂直面, RL は右の LRF の左の垂直面, RR は右の LRF の右の垂直面を示す。回避行動の基本方針は右側で検知したら左側に旋回する、左側

で検知したら右側に旋回することとし、複数の点で検知した場合はより正面に近い方向にあるとみなし、より速く旋回させる。前方の点のみ (LR と RL) やすべての点で検知した場合は、正面に段差があるとみなし前進を停止させる。ただし、後進や旋回は可能とする。目標左右旋回速度は衝突時間  $t_c$  に反比例した角速度であり、表 C-1-7 に示す値に設定した。また、高速走行時の急旋回を避けるために衝突時間が 2[s] 以下かつ LL~RR のいずれかで検知した場合は、 $t_c/2$  を目標制御速度に乗じて減速させることとした。

以上の回避行動については、ユーザがジョイスティックなどで入力した目標値を上書きする形で実行する。表 C-1-6 の一番下の何も検知していない場合などは、ユーザの入力どおりに車いすを制御する。

### 1. 4 下り段差回避実験

提案した段差検知・回避手法が有効であるかを確認するために産総研敷地内の屋外実環境で走行実験を行った。下り段差回避実験で使用した基礎実験用試作機を図 C-1-28、図 C-1-29 に、仕様を表 C-1-8 に示す。この車いすにはジョイスティックが取り付けられており、ジョイスティックの倒し角を PC で取得し車輪の速度制御が可能である。図 C-1-30 にシステムの構成を示す。ノート PC でミラー付き LRF のデータを取得、段差検知を行い、回避行動の要求を車いす (ボード PC) に送信する。車いす側はノート PC に衝突時間を計算するための車輪の角速度を送信する。また、ジョイスティックや受信した回避行動に応じたモータの速度フィードバック制御を行う。

図 C-1-31 のコースを走行させ、段差を回



避できるかを確認した。コースは産総研敷地内のロータリー内の歩道で、右側が車道への下り段差、左側が植え込みの縁石による上り段差である。ジョイスティックは前方に倒したまま固定し、車いすの速度は最大約 3km/h で走行させた。

図 C-1-32 に実験の様子を示す。写真下部に写っているのが図 C-1-31 の下り段差であり、写真はこの段差を回避するために旋回している途中である。

図 C-1-33 に実験中に検知した段差と段差まで距離、車いすの方位角を示す。まず、2 秒を過ぎた所で約 130cm 先に約 20cm の下り段差を検知した。その後、方位角が増加していることから回避していることが分かる。次に、約 7 秒後、約 120cm 先に約 7cm の上り段差を検知し、先程とは逆方向に旋回している。この段差は図 C-1-31 の左端の上り段差である。最後に、約 10 秒後に約 170cm 先に約 20cm の下り段差を検知した。この段差は図 C-1-31 のゴール右側の段差で、直前の回避行動で車いすがこの段差側に向いたため検知したと考えられる。なお、0~2, 4~6 秒で方位角が少しずつ増えているが、屋外で行ったため路面の少しの傾きにより片側へ流れていることが原因である。以上のように、提案したミラー付き LRF により段差を検知・回避する手法により実環境において段差を回避できることがわかった。なお、図 C-1-34 に示すように、プロト機、成果機にも搭載し、開発した技術の検証を行った。

## 2. 段差踏破技術

簡易型電動車いすの場合、駆動輪軸を前方へ移動させ、重心を後ろ寄りに設計することで、前輪キャストの持ち上げが容易になり、

操作者が意図的に車いすをウイリー状態にさせなくても段差踏破がしやすくなる。しかし、その一方で、後方へ転倒し易くなるため、通常の固定式後方転倒防止バーでは、過度に後傾し不安定な状態に陥る。

本研究開発で開発した簡易型電動車いすは、重心位置が通常的車いすよりも後方に設計されている。その車いすに受動的に可動できるようにした電磁ブレーキ付き後方転倒防止バーを開発し取り付けた。ピッチ角や前後方向の加速度の値に応じて電磁ブレーキの ON と OFF を切り替えてバーの固定状態と解放状態を制御することで後方への過度な傾きを防止し、安定段差踏破を可能とする。

この機能を用いることにより、ユーザは街中に多く存在する段差をより楽に、安定した状態で踏破できるようになる。

### 2. 1 パッシブな転倒防止バー

車いすには図 C-2-1 のような後方転倒防止バーと呼ばれるものが車いすに取り付けられていることが多い。後方転倒防止バーにより後方への傾きが一定角度で抑えられ転倒を防止することができる。しかし、従来の後方転倒防止バーは車いすのフレームに固定されているため、図 C-2-2 のように段差や坂道を登るときや急発進時などに、大きく後方に傾いてしまう。

本研究開発では、図 C-2-3、図 C-2-4 のようなパッシブに可動する後方転倒防止バーを用いる。通常時は車いすとの接合部を軸に地面に沿って可動するが、段差踏破時や上り坂登坂時などにはバーの付け根に取り付けた電磁ブレーキによりバーを固定し後方への過度の傾きを防止する。

## 2. 2 転倒防止バー制御

段差踏破時にピッチ角度と X 軸（進行方向）の加速度が増加することに着目し、加速度  $x'$  とピッチ角度  $\theta_p$  があらかじめ設定した閾値を連続して  $n$  回超えたら電磁ブレーキを作動させバーを固定し、別の閾値を下回ったら電磁ブレーキを解除しバーをパッシブに戻す。図 C-2-5 に制御のステートマシン図を示す。

図 C-2-6 は、高さ 2.5cm の段差を乗り越えたときの加速度  $x'$  とピッチ角度  $\theta_p$  である。段差を乗り越え始めてすぐにピッチ角の増加と共に加速度が増加していることが分かる。図 C-2-7 は転倒防止バーを機械的に固定し後方へ傾かないようにして、平地で車いすを急加速で発進・走行・停止させた場合の加速度の推移である。

通常走行時に誤検知しないようにするためには、図 C-2-6 より加速度の閾値の絶対値は 0.3 以上が適当と考えられる。急発進を検知するためには図 C-2-7 より発進、停止時の加速度である 0.4 程度が良いと考えられる。ただし、急減速（正方向の加速度）は車いすが前のめりにはなるが後方へ傾くことはないため検知対象外とする。よって、加速度  $x'$  の電磁ブレーキをかける閾値は  $-0.4$  とし、通常走行時に電磁ブレーキを解除するための閾値は  $-0.2$  とした。ピッチ角度の閾値は上り坂で常にバーを固定しておくために  $-4^\circ$  とした。

## 2. 3 段差乗り越え実験

提案した転倒防止バー制御法の有効性を確認するために、段差に向かって走行させ踏破する実験を行った。実験に用いた電動車いすは片流れ防止実験で使用したのと同じであ

る。転倒防止バーの仕様を表 C-2-1 に示す。ハーモニックギアは転倒防止バーの回転軸に連結し、電磁ブレーキのブレーキトルクを増すためのものである。

高さ約 2.5cm と 4.5cm の段差に対し、図 C-2-8 のように段差の約 1m 手前から最大約 2.5km/h で走行し、図 C-2-9 のように前輪が段差に接触し停止した状態から段差を乗り越える実験と、傾斜角度  $6^\circ$ 、 $8^\circ$  の斜面を直角に登坂する実験を行った。

まず、4.5cm の段差の結果について示す。図 C-2-10～図 C-2-13 に助走の有無および転倒防止バー制御の有無のそれぞれの場合のピッチ角度と進行方向の加速度を示す。ピッチ角度は負方向が後方、加速度は負方向が前方である。制御ありの場合はさらに転倒防止バーが固定されている間を緑のプロットで示す。

図 C-2-10 は、4.5cm の段差に 1m 手前から走行し、転倒防止バー制御なし（ブレーキフリー）の場合である。これを例に段差踏破時の加速度とピッチ角度の変化をしてみる。1秒付近の加速度の変化は走行開始時の加速である。3秒付近の急激な加速度の変化は段差に前輪が衝突したときの衝撃である。段差に衝突後、3～5秒にかけて段差を乗り越えている。4秒付近で正方向の加速度が発生し、ピッチ角度の変化が緩くなっている箇所は駆動輪が段差を乗り越え始めたときである。6秒付近で段差を乗り越えて車いすが水平に戻り、前輪が接地する。このときの正方向の加速度は接地の衝撃である。以上が段差踏破時に見られる加速度とピッチ角度の変化である。これらの変化のうち、段差を乗り越えている間のピッチ角度の変化について注目する。

図 C-2-10 では約  $22^\circ$  まで後方へ傾いているが、ブレーキ制御を行った場合の図 C-2-11

では、約 16° までの後傾で収まっている。また、図 C-2-11 より 1.5 秒からの発進時の加速と 4~7 秒の段差乗り越え時に転倒防止バーが固定されている。

4.5cm の段差に接触した状態から乗り越える場合、制御なしの図 C-2-12 では、約 24° まで後方へ傾いている。制御ありの図 C-2-13 では、約 15° まで後方へ傾いている。また、図 C-2-13 より 3~5.5 秒の段差乗り越え時に転倒防止バーが固定されている。

4.5cm の段差の場合には助走ありと助走なしともに、制御なしだと約 24° 付近まで後方へ傾いた。実験に用いた車いすは転倒防止バーの可動範囲の上限まで傾けると 24° まで後方へ傾く。よって、制御なしの場合は後方へ可動範囲の上限まで傾いている。制御ありだと約 16° 付近まで後方へ傾いた。実験に使用した車いすで 4.5cm の段差に手押しで添わせると最低でも 14° まで後方へ傾ける必要があった。よって、制御ありの場合は必要最小限の角度まで傾いていると言える。

助走ありで 2.5cm の段差乗り越えの場合、制御なしの図 C-2-14 では、約 2° 後方へ傾いている。制御ありの図 C-2-15 では、約 4° まで後方へ傾いている。また、図 C-2-15 より 3.5~5.5 秒の段差乗り越え時に転倒防止バーが固定されている。

助走なしで 2.5cm の段差乗り越えの場合、制御なしの図 C-2-16 では、約 14° まで後方へ傾いている。制御ありの図 C-2-17 では、約 7° まで後方へ傾いている。また、図 C-2-17 より 2~3 秒の段差乗り越え時に転倒防止バーが固定されている。

2.5cm の段差の場合には 1m 手前と接触した状態では結果が異なった。1m 手前からの場合は後方へあまり傾いていないが、接触した状

態からでは大きく後方へ傾いた。4.5cm の段差の場合には段差が高いため衝突し速度が落ちたが、2.5cm では低いため速度が落ちずに段差を乗り越えられることが原因と考えられる。制御ありの場合は、最大約 7° まで後方へ傾いた。実験した車いすで 2.5cm の段差に手押しで添わせると最低でも 6° まで後方へ傾ける必要があったことから、制御ありの場合は必要十分な角度まで傾いていると言える。

次に、6° の上り斜面走行の場合、制御なしの図 C-2-18 では、約 5° まで後方へ傾いている。制御ありの図 C-2-19 では、約 2° まで後方へ傾いている。また、図 C-2-19 より転倒防止バーは一度も固定されていない。

8° の上り斜面走行の場合、制御なしの図 C-2-20 では、約 20° まで後方へ傾いている。制御ありの図 C-2-21 では、約 14° まで後方へ傾いている。また、図 C-2-21 より 3 秒以降は常に秒転倒防止バーが固定されている。

6° の上り斜面走行では転倒防止バーが固定されることはなかったが、必要以上に傾くこともなかった。8° の斜面を手押しで登坂させると最低でも 13° まで後方へ傾ける必要があった。よって、約 14° まで後方へ傾いた制御ありの場合は約 20° まで傾いた制御なしの場合より必要十分な角度までに抑えられていると言える。

以上より、提案した転倒防止バー制御により、段差踏破や斜面登坂のために必要最小限の後傾に抑えられたので、後方への過度の傾きを防止できることが確認できた。

### 3. 直進走行技術

図 C-3-1 のように、左右方向に傾斜している斜面横断時において、重力による旋回モーメントにより車体が次第に斜面下方へ向く現

象が片流れである。特に、重心位置が駆動車輪よりも前方にある電動車いすでは起こりやすい。このような斜面横断走行において、通常ユーザはジョイスティックを意図的に山側に倒すことによって走行方向を補正し、直進走行を実現しており、操作性や安全性の面で問題になっている。

片流れ時にはジョイスティックで入力された目標角速度と実際の車いすの角速度が異なるため、上記目標角速度  $\omega$  とレートジャイロより取得した実際の角速度（ヨーレート）の差が0になるように目標角速度を補正する。具体的には、左右輪への目標角速度に対して、上記のヨー角速度差が0になるように角速度差、その積分値をフィードバックすると共に、ロール角度についても考慮すると有効であることが分かり、その制御則を実装した。

この機能を用いることにより、ユーザは街中の歩道などに多く存在する傾斜路で、斜面方向に流されることなく容易に直進することが可能になり、片流れによる車道への飛び出しなどのリスクを軽減することが出来る。

### 3. 1 片流れ現象

斜面を車いすなどの4輪移動体で走行すると車体の向きが次第に斜面下方へ向き始める。図 C-3-1 より式(1) のような旋回モーメントが原因と考えることができる [C2]。

車いすの前輪は自由に回転するキャスタ車輪のため、ハンドル型電動車いすのような機構よりも旋回モーメントの外乱に弱い。そのため、平地と同じ感覚で電動車いすを走行させると図 C-3-2 のように片流れが生じる。

$$M = mgL \sin \theta \quad (1)$$

$m$  : 車いすと搭乗者の質量

$L$  : 重心と駆動輪の車軸の距離

$\theta$  : 斜面の勾配

$M$  : 旋回モーメント

### 3. 2 片流れ防止制御

本研究開発では片流れ時にジョイスティックで入力された目標角速度と実際の車いすの角速度が異なる点に注目する。図 C-3-3 に約  $4^\circ$  の斜面を走行させたときのヨー角速度を示す。4秒から走行を開始しているが、開始直後から片方に偏ったヨー角速度が発生している。このときジョイスティック入力の横方向の値はソフトウェア的に常に0に置き換えている。つまり、目標角速度は  $0[\text{rad/s}]$  にしている。このように、ジョイスティックで操作者より入力された目標角速度  $\omega$  とレートジャイロで取得した実際の角速度（ヨーレート） $\omega_v$  との差が片流れ時に生じる。

そこで、式(1)により  $\omega - \omega_v$  及びその積分値が0になるように目標角速度を補正することで片流れを防止する。また、本体のロール角度に関しても補正量の計算に加える。式(1)において、 $\omega_a$  は補正後の目標角速度、 $\theta_r$  はロール角度、 $K_v$ 、 $K_{vi}$ 、 $K_r$  は各項のゲインである。

$$\omega_a = \omega + K_v(\omega - \omega_v) + K_{vi} \int (\omega - \omega_v) dt + K_r \theta \quad (1)$$

斜面が緩やかな場合、 $\omega - \omega_v$  の値は小さいが着実に片流れするため積分項を入れている。また、ロール角度の項を加えることで傾斜角度に応じた補正角速度の初期値を付加することができる。なお、後退するときは角速度の向きと斜面の傾斜方向の関係が逆転するためロール角度ゲインの符号を反転させる。

### 3. 3 片流れ防止実験

片流れ防止制御が有効であるか確認するために、実験室内に作成した模擬傾斜路で走行実験を行った。片流れ防止実験で使用した先行試作機を図 C-3-4 に、仕様を表 C-3-1 に示す。レートジャイロの外形を図 C-3-5、仕様を表 C-3-2 に、加速度センサの外形を図 C-3-6、仕様を表 C-3-3 に示す。また、模擬斜面路を図 C-3-7、表 C-3-4 に示す。模擬斜面路は電動ジャッキで片端を持ち上げることで傾斜角度を変えられる。

まず、Ky, Kyi, Kr の各項の有効性を確かめるために、片流れ防止制御なし、Ky 項のみ、Kyi 項のみ、Ky 項と Kyi 項、Ky と Kyi と Kr 項で制御の 5 パターンについて実験を行った。同様の実験を、傾斜角度  $6^\circ$  と  $8^\circ$  について、制御ありとなしの場合について実験を行った。さらに、ゲイン Ky, Kyi, Kr を可変させて実験を行った。

各実験項目では、図 C-3-7 の模擬傾斜路を直進走行させ片流れするかを確認した。ただし、ジョイスティック入力は前後方向のみの値を使うものとし、回転方向の値はソフトウェア的に常に 0 とすることで、直進入力しかできないようにする。また、ゲイン Ky, Kyi, Kr を可変させる場合を除いて、事前に試行錯誤により定めた  $Ky = 1.75$ ,  $Kyi = 1.3$ ,  $Kr = 1.3$  を用いる。走行速度は、片流れをより起きやすくするために最大約  $1.5\text{km/h}$  とした。

まず、図 48 に Ky, Kyi, Kr の各項がある場合とない場合の方位角の変化を示す。方位角の正方向が斜面下方、負方向が斜面上方である。制御なしの場合が最大  $63^\circ$  まで旋回し最も斜面下方へ片流れしている。Ky 項のみの場合は最大  $47^\circ$  まで旋回し、制御なしの場合よりは片流れしていない。Kyi 項のみの場合

は最大  $18^\circ$  まで旋回しているが、6 秒付近から  $0^\circ$  に戻りつつあるため積分項が効いていることが分かる。Ky 項と Kyi 項の場合は斜面上方へ最大  $33^\circ$  旋回している。これは片流れ防止制御が効き過ぎているためである。すべての項を使った場合は最大  $15^\circ$  まで旋回しているが、最も  $0^\circ$  に近く  $2.2^\circ$  まで戻っている。以上より、各項がどれも有効であることが確認できた。

次に、傾斜角度  $6^\circ$  と  $8^\circ$  の場合の方位角の変化を図 C-3-9 に示す。制御なしの場合は、どちらも約 3 秒後には約  $90^\circ$  以上旋回し斜面を下っていることが分かる。また、傾斜角度  $6^\circ$  の場合は約  $40[\text{deg/s}]$  で旋回しているが、傾斜角度  $8^\circ$  の場合は約  $50[\text{deg/s}]$  で旋回しているため、傾斜角度  $8^\circ$  の方がより片流れしやすいと言える。一方、制御ありの場合はどちらも同じように約  $10^\circ$  斜面を上っている。よって、角度が異なっても同じゲインで片流れを防止できる。

ゲイン Ky, Kyi, Kr を可変させた場合の方位角の変化を図 C-3-10～図 C-3-12 に示す。Ky は 0.25 ずつ、Kyi と Kr は 0.4 ずつ変えて、それぞれ 5 パターンを行った。

最終的な方位角が  $0^\circ$  に最も近いゲインをそれぞれ選ぶと、 $Ky = 1.5$ ,  $Kyi = 1.7$ ,  $Kr = 1.7$  となった。初期値は  $Ky = 1.75$ ,  $Kyi = 1.3$ ,  $Kr = 1.3$  であるため、より最適なゲインを選択できたと考えることもできる。しかし、ゲインを可変させた場合いずれも結果が異なるが、片流れをある程度防止できていることが分かる。

各ゲインの値によって多少片流れの防止具合が変わるが、人間のジョイスティックの操作による補正量が  $1/9$  まで改善されることを確認しており、提案した制御手法が斜面横断時の片

流れを防止に効果があることを確認した。

#### 4. 対人衝突回避技術

全方向ステレオカメラによって電動車いす周囲を高精度かつ高頻度でセンシングすることによって、例えば人混みの中であっても、人と衝突せずに走行することを可能にする機能の開発を行った。

このような車両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実用化されはじめている。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、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既に実用化されている。

自動車の場合は「道路」という排他的な占有走行環境を走行することが前提であるため、前方のみの安全を確認するだけでも、最低限の安全を確保することが出来る。しかし、これに対し電動車いすは、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、全ての方向を同時にセンシングし、リアルタイムで安全を確認する必要がある。そこで我々は、全方向の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強力な能力を持つ「全方向ステレオカメラ」を電動車いすに搭載した。

この機能は、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、周囲の人物や障害物、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。これにより、人混みや狭い通路などであっても人や障害物との衝突リスクを低減した走行が可能になる。

#### 4. 1 暗視対応全方向ステレオカメラの概要

暗視対応全方向ステレオカメラ（以下、全方向ステレオカメラと記す）はボール状の構造を持ち、前後・上下・左右全ての方向にわたる全く死角のない画像と距離情報（3次元情報）を、太陽光下から暗闇まであらゆる照明条件下において、リアルタイムで取得できる今回開発を行った世界初の画像センサである。図 C-4-1 にカメラの外観、表 C-4-1 に主な仕様をそれぞれ示す。

図 C-4-2 に全方向ステレオカメラの構成図を示す。カメラ装置は、ボール状にカメラが集積されたカメラヘッド部と、カメラ制御および PC との通信を行う制御部（83(W)×128(H)×67(D) (mm)の小型ボックス)に大別することが出来る。カメラヘッド部と制御部は専用のケーブルで接続されるが、制御部と PC の間は標準規格である PCI Express ケーブル (x4) を採用し、近年では大多数の PC に標準的に装備されている PCI Express スロットに接続する方式とした。これにより、ごく一般的に流通しているコストの低い PC を処理系として用いることが出来る。

全方向ステレオカメラのカメラヘッド部の基本形状は正十二面体で、その各面上にステレオカメラユニット（図 C-4-3）を1ユニットずつ、合計12ユニット配置している。ステレオカメラユニットは3つのカメラ（3眼）で構成され、2辺の長さがそれぞれ60mmとなる直角二等辺三角形の3つの頂点上にカメラを配置している。ステレオカメラユニットは、人間が両目の視差を利用して距離を計測することと同様の原理で、観測している対象までの距離を測定することが出来る。原理的には人間と同様の2眼でも距離を測定することが出来るが、3眼とすることで計測性能

をより高めることが出来る（より多眼化することで更に性能を高めることが出来るが、大きさと性能のバランスが良い3眼を採用した）。

ステレオカメラユニット上の3つのカメラのうち、三角形の直角の頂点に位置するカメラ（以下、センターカメラと呼ぶ）がそのユニットを代表して画像を取得し、残りの2つのカメラは、センターカメラとの視差を利用して距離を計測するために用いる。それぞれの個別カメラの解像度は640(H)×480(V)画素である。

各カメラの撮像素子は、広ダイナミックレンジ（約110dB）の特性を持つ、1/3インチ、グローバルシャッターCMOSを採用した。一般的なローリングシャッター方式（撮像管のように1走査ラインごとに順次シャッターを切る方式）のCMOSは、入手が容易である一方で、撮像対象やカメラ自身に動きがある場合、画像がスキャンラインの時間差の影響で歪む問題があるが、グローバルシャッター方式は画像全体で同時にシャッターが切られるため、電動車いすで動きつつ、周囲の移動する人物を観測するような場合に適している。

#### 4. 2 マルチバンドパスフィルタ

通常、カメラには可視光以外の入射、特に赤外光の入射による明度の飽和を防止するために、赤外光カットフィルタが内蔵されている。特に太陽光下や、白熱電球下では強力な赤外線が照射されているため、赤外カットフィルタは必須となる（快晴時など紫外線が強い環境では紫外線カットも行うことが望ましい）。しかし一方で、本カメラでは暗闇において850nmの中心波長を持つ近赤外光で照明を行うことを想定しているため、通常の赤外

光カットフィルタを用いることが出来ない。

このような場合、屋外を昼夜監視するカメラなどでは、フィルタを日没時と日の出時に機械的に出し入れすることにより、対応する方法をとる場合があるが、フィルタの出し入りに要する時間と、カメラのゲイン等をそれに合わせて自動調整するための時間の合計時間の間、周囲のセンシングが出来なくなるため、電動車いすのように、室内外を頻繁に出入りする可能性がある機器では不都合である。

そこで我々は、太陽光下から暗闇まであらゆる照明条件にシームレスに対応するために、図C-4-4に示す特殊なマルチバンドパスフィルタをカメラに内蔵した。フィルタの入射光波長に対する透過率（設計値）を図C-4-5に示す。このフィルタでは、可視光領域と850nmの波長を中心とする近赤外光を選択的に透過させることにより、太陽光下などにおける赤外線や紫外線による明度飽和を避けつつ、暗所では850nmの近赤外光による照明に対応することが出来る。

#### 4. 3 近赤外光投光器

図C-4-6に今回開発した近赤外光投光器の外観を示す。電動車いすに搭載するためには、周囲の環境を十分な明るさで照明すると同時に、小型・軽量かつ低消費電力である必要がある。この点が開発のうえで困難なポイントであった。この問題を解決するために、高効率のLED（約5.5W）を採用し、冷却ファン等も組み込むことで放熱の問題もクリアし、40(W)×40(H)×47(D)mmの手のひらに乗る極めてコンパクトなサイズ（図C-4-6）を実現した。図C-4-7に赤外線カメラで撮影した照明の様子を示す。コンパクトなサイズでありながら広範囲を高い輝度で照明できてい

ることがわかる。なお、照明に肉眼では不可視の 850nm の近赤外光を用いた理由は次の通りである。

- 1) 周囲の歩行者を眩感しない。
- 2) 映画館や暗く調光された店内などに影響を与えない。

一方、近赤外光による照明は肉眼では一切見えないため、周囲の目視が困難な暗闇などでは別途可視光の照明を（ユーザの目視を助けるために）設ける必要がある。試作機では、可視光の前照灯を 1 機、前方に向けて設置した。

#### 4. 4 全方向ステレオカメラを搭載した電動車いすの概要

図 C-4-8 に全方向ステレオカメラを搭載した電動車いすの外観を示す。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。更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、そのまま乗り降りが可能である。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場合は、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出来る。

画像情報を処理し、電動車いすの制御を行う 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。その他、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。

図 C-4-9 に近赤外光投光器の設置位置を示す。投光器は前後左右の 4 カ所にそれぞれ設置した。当初は投光器の性能が低く、6 台 6 方向の設置を検討したが、図 C-4-7 で示した通り、性能の高い投光器を開発することに成功したため、4 台 4 方向で周囲を十分な明るさで照明することが可能になった。

図 C-4-10 に、近赤外光投光器による照明の様子を示す。上段 (a) は可視光カメラで撮影したもので、照明は肉眼では全く観測されないことがわかる。下段 (b) は赤外カメラで観測したもので、車いす周辺が 4 つの投光器によって明るく照らされていることがわかる。上段 (a) では確認が難しかった周囲の 3 人の人物もはっきりと確認することが出来る。肉眼では上段 (a) のように見えるため、周囲の歩行者を眩感することがなく、一方で全方向ステレオカメラからは下段 (b) のように暗闇であっても周囲を十分な照度で観測することが可能であることがわかる。

電動車いすには、図 C-4-11 に示す情報端末を設置している。この端末には、全方向ステレオカメラによって観測した全方向画像を表示し、前方や後方、左右の安全を確認できる（図 C-4-11）ほか、安全機能の動作状態をピクトグラムでわかりやすく確認することが出来る。図 C-4-12 に安全機能の動作状態表示の例を示す。(b) はバック時に後方から右後方にかけて障害物を検知し、減速している場合の表示である。障害物が検知された方向に衝突を表すピクトグラムを表示することで、減速の理由が直感的にわかるようになってい



る。(c)は前進時に前方に転倒・転落の危険がある段差を検知し、自動停止した場合の表示で、この場合も転倒・転落の危険を表すピクトグラムを危険が存在する方向に表示することで、停止した理由を直感的に理解しやすくしている。

実証実験の結果から、安全機能の動作状態をユーザに的確に伝えることが極めて重要であることがわかった。安全機能が障害物などを検知して自動減速・停止した場合、その理由がユーザにとって自明でない場合、勝手に減速・停止することに対する不快感を感じたり、故障による減速・停止と区別が難しいため不安感を感じる場合があることがわかった。そこで、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ことにした。そして「STOP」、「Slowdown」などを大きな文字でコントラスト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た。これらの表示と合わせてアラーム音によって動作状態を知らせる機能も合わせて実装しており、ユーザの好みに応じて設定し、用いることが出来る。

#### 4. 5 電動車いす周囲環境の危険検知

図 C-4-13 に今回開発した全方向ステレオカメラにより実際に取得した全方向距離情報の例を示す。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。

(a)～(c)は1回の撮影で取得した同一の全方向距離情報を3つの異なる仮想視点から表示したものである。観測されたデータを

フィルタ処理せず直接プロットしているため、ややノイズを含んではいるが、電動車いす周囲の環境が三次元的に捉えられている様子がわかる。全方向ステレオカメラでは、このような観測点が30万点にもおよぶ距離情報を1秒間に30回の頻度で取得することが出来る。これにより、電動車いすが法定最高速度の6 km/h で走行しているときであっても、約5.6 cm 進むごとに1回という十分な頻度で危険検出を行うことが出来る。角度分解能は $360/512$ 度=約0.7度である。

図 C-4-14 に人混みを想定した環境で、電動車いすを走行させながら周囲の人物を検出した例を示す。電動車いすから1.2 m 以内に位置する領域を黄色、0.5 m 以内に位置する領域を赤色で表示している。画像はメルカトル図法に基づいたパノラマ画像表示となっており、画像の中央が電動車いすの前方、画像の左右端は実際には連続になっていて、電動車いすの後方を示す。(画像の上端は電動車いすの真上、画像の下端は真下を示す。)図から全ての方向にわたって、適切に周囲の人物が検出できていることがわかる。

走行時の危険検知においては、検出された周囲の人物等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 C-4-15 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。このエリアの幅や距離は任意に設定することができるが、ここでは、判定エリアの直径はそれぞれ1.2m (減速エリア)、0.5m (停止エリア)とした。床面の高さを0としたとき、-0.5m (床より低い) から1.6m の高さまでに存在する物体を全て検出する。

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、前進しつつ回転が加わる F+1～F+2 では、ユーザ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 considering 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。更に、床より低い領域も検出対象としているため、段差や下りの段差なども検出し、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。

図 C-4-16 に障害物検出実験の例を示す。左列 (a) は障害物検知を有効にしている場合で、(1) で後退を開始し、(2) で自動減速し、(3) では衝突の危険があるため自動停止した。これに対し、右列 (b) は障害物検知を無効にしている場合で、(1) で後退を開始したが、(2) を経て (3) で障害物に衝突した。全ての方向にわたって危険が検出できるということは、物理的な安全性が高まることはもちろんのこと、ユーザの気持ちに対しても大きな安心感を与えることができると考えられる。

図 C-4-17 に巻き込みを想定した障害物検出実験の例を示す。図 C-4-16 の実験と同じ

く (a) は障害物検知を有効にしている場合で、(1)～(2) で前進したあと、(3) で急激に右旋回を開始したが、電動車いすの側方に障害物が巻き込まれると判断され、自動停止した。これに対し、障害物検知を無効にしている右列 (b) では、(3) で急激に右旋回を開始した後、(4) で障害物を巻き込むように衝突した。

#### 4. 6 暗環境での危険検知

既に 4. 4 で述べたとおり、今回開発した電動車いすは近赤外光投光器およびマルチバンドパスフィルタを搭載した全方向ステレオシステムを搭載しており、照度がほぼ 0 の暗環境下であっても問題なく危険検出を行うことができる。

図 C-4-18 は暗環境下における障害物検出実験の例である。左列 (a) は通常の可視光カメラ、右列 (b) は赤外光カメラによって撮影した映像である。これらは 2 台のカメラをガムテープで 1 つに縛って固定したうえで撮影したものであるため、固定の都合で若干カメラアングルは異なるものの、(1)～(4) の (a)、(b) はそれぞれ全く同時刻に撮影されたものである。(1) は前進走行中で、(a) の可視光画像では照度が低く、ほとんど何も確認することができないが、(b) の赤外光画像では、近赤外光投光器によって周囲が明るく照明されていることがわかる。(2) の (a) では、電動車いすの前照灯 (ユーザの前方視界を確保するため、可視光の自転車用前照灯を一機搭載している) が何かを照らし出しているが、(b) を見ると、それが通路に設置された小型のロッカーであることがはっきりわかる。(3) では衝突の危険がある距離まで電動車いすがロッカーに近づいたので、自動停

止した。続いて図 C-4-19 の (5) では一旦後退するためにジョイスティックを後方に倒したが、直ちに自動停止した。(6)を見ると、このとき後方に歩行者が接近していたことがわかる。

普段バック時には細心の注意を払っている、というユーザでもこのように危険を感じたあとに慌ててバックするケースでは後方の注意が十分でないケースがある。しかもこのような暗闇では周囲確認の困難さが増し、より危険な状態となる。本機能は、いかなる照明条件下であっても、あらゆる方向に対して時間遅れなく瞬時に危険検知を行うことが可能で、安全な走行を強力にサポートすることができる。

図 C-4-20 に (a) 日没時、および (b) 夜間、において、下り階段を検出し停止する実験を行った例を示す。既に述べたとおり、床面の高さを 0 としたとき、 $-0.5\text{m}$  (床より低い) から  $1.6\text{m}$  の高さまでに存在する物体を検出しているため、床上に位置する障害物のみならず、段差や下り階段等の検出も同時に行うことができる。それぞれ (1) では下り階段に向かって走行している。(2) では下り階段が近づいたため、自動減速し、転落の危険がある (3) で自動停止した。図 C-4-21 は、(b) の照明条件下で、図 C-4-20 の実験とは別に、人を乗車させず無人走行で廊下と下り階段の境目まで電動車いすを移動させた際の、図 C-4-15 の F0 の stop area 内で、且つ床より低い位置に検出された 3 次元観測点数を表す。縦軸が観測点数で、横軸は下り階段の境目までの距離(mm)を表す。 $-500\text{mm}$  のあたりから、床面より低い階段の段が検出されはじめ、急速に観測点数が増えていることがわかる。図 C-4-20 の実験では観測点数

の数が 200 を超えた時点で停止するよう設定したため、階段の境目まで約  $30\text{cm}$  の地点で停止した。図 C-4-21 のグラフからもこのことが読み取れる。

## 5. 対人協調走行技術

電動車いすが前章で述べた危険検知を行いつつ自動的に特定の人物を追跡して走行する機能について検討を行った。

電動車いすの自動運転は、その実現を望む強い要望があるが、移動経路を決定するためには、移動区間内の正確な環境マップを持つか、走行する路面等に誘導マーカ (IC タグ、磁石、画像タグ、発信器など) を連続的に敷設する必要があり、実用化には多くの時間を要することが予想される。そこで、経路の決定は先導する人物が行い、その人物を自動的に追走する機能の検討を行った。この機能が実現すると、先導する人物がいる場合には運転操作を行うことなく安全に移動を行うことができるようになる。

### 5. 1 解決が必要な課題

このような追跡を検討する場合、解決が必要な課題がいくつかある。

- A) 対象が速い速度で移動する場合、センサ (カメラ・レーザーなど) の測定範囲外に出てしまい、見失うことがある。
- B) 対象までの距離を測定する必要がある。
- C) 対象が激しく動いた場合でも他の物体と区別して追跡し続ける必要がある。

これまで既に述べた通り、全方向ステレオカメラは死角のない視野を持ち、画像と同時に周囲の 3 時限情報を高い空間・時間解像度で取得することができるので、これを用いることで、上記の A) および B) は解決すること

ができる。

## 5. 2 協調走行アルゴリズムの実装

前節における C) の課題を解決するためには、適切な追跡（トラッキング）アルゴリズムを実装し、用いる必要がある。今回は高速且つ追跡性能が高いとされているパーティクルフィルタ[C3]をベースとした追跡アルゴリズムを実装した。

パーティクルフィルタは時系列ベイズ推定の一形態で、現状態から遷移する次状態を、多数の粒子に見立てる。そして、全粒子の尤度に基づいた重みつき平均を次状態として予測し、追跡を行うアルゴリズムである。詳細なアルゴリズムは文献[C3]に譲るが、古くから追跡手法としてよく用いられるカルマンフィルタが状態方程式の線形化を必要としたのに対し、パーティクルフィルタでは尤度関数のみ定義できれば、さまざまな問題に対して適用することができる。また、アルゴリズムが単純であるため、高速な実装を検討することが可能で、リアルタイムシステムに適している。

通常の2次元画像を用いた追跡では、追跡対象の色やテクスチャ（模様）を手がかりに尤度を定義し、追跡を行うが、屋内から屋外まで様々な条件で用いることが想定される場合には、照明条件の変化などの影響で追跡が不安定になる問題がある。そこで本研究開発では、全方向ステレオカメラから得られる全方向3次元情報に対してパーティクルフィルタを適用するアルゴリズムを実装した。具体的には、直前（時刻 $t-1$ ）のフレームにおける各パーティクルの持つ距離値の中央値（メディアン）、および人物の身長、横幅を尤度算出のためのパラメータとして用い、追跡対象

モデルのダイナミクスとしては、追跡対象の動きが予測できないことから、ランダムウォークモデルを採用した。パーティクル数は1,000とした。

図 C-4-22 の左列は物体までの奥行きを明るさ（白：近い～黒：遠い）で表した全方向パノラマ奥行き画像である。これに対し、右列は追跡結果で、パーティクルを青点、人物の位置推定結果を赤線で示す。赤線は青点のx座標（横軸方向）の中央値で求めている。中央値は外れ値に対してロバストであるので、測定エラーによる例外値や、追跡の過程で追跡対象候補が複数になってしまった場合でももっとも優勢な候補を（他の候補の影響を受けずに）追跡し続けることができる。

実際に追跡を行う場合の追跡対象の指定は、ユーザが情報端末を用いて行うなどの方法が考えられるが、ここでの実験では簡単のため、追跡開始時にもっとも近くに位置している人物を追跡対象とした。図 C-4-22 (1) 右は初期状態（最初のフレーム）である。パーティクル（青点）を検出対象範囲にランダムに散布している。最初のフレームでは、このうち、近い距離値を持つパーティクルほど高い尤度を与えるので、数フレーム後の(2)では、人物の位置にパーティクルが集まってきていることがわかる。その後のフレームでは、直前のフレームのパーティクルの持つ距離値の中央値を尤度計算のパラメータとして用いているため、(5)～(6)のように追跡対象が遠ざかった場合でも安定に追跡できていることがわかる。

図 C-4-22 右列の赤線から追跡対象までの角度、パーティクルの持つ距離値の中央値から追跡対象までの距離がわかるので、これを用いて追跡を行う。そのアルゴリズムは次の

通りである。

- i. 現時刻での観測を行う。
- ii. 追跡対象までの角度から仮想ジョイスティックを倒す方向を決定する。(試作機におけるジョイスティック出力は(電動車いすに直結ではなく)PCに接続されており、PCでモータ制御命令を出しているため、PC上で仮想的にジョイスティックを倒し、電動車いすを制御することができる。実物のジョイスティックと区別するため、これを仮想ジョイスティックと呼ぶ。)ただし、追跡対象が電動車いす後方に位置している場合(図C-4-15のBの領域)は、バックで追跡することはせず、一旦Fの領域に入るまでLまたはR回転する。
- iii. 対象までの距離に応じた速度で実際に移動する。スムーズな移動を行うため、速度の決定にはバネモデルを用い、追跡対象が遠方にある場合は高速、追跡対象が目標距離に近づくほど低速になるよう制御する。目標距離より対象が近づいた場合には速度を負にして距離を保つ。
- iv. 図C-4-15のslowdown areaに追跡対象以外の物体が検出された場合には減速すると同時に、その物体を回避する方向に仮想ジョイスティックの方向を補正する。
- v. 図C-4-15のstop areaに追跡対象以外の物体が検出された場合には追跡を中断、電動車いすをその場で停止させたうえで、アラーム音で先導する人物に知らせる。
- vi. 追跡対象を見失った場合(先導する人

物が廊下の直角の曲がり角を壁に沿って小回りで回り込んだ場合などは、30フレーム分だけ最後の観測結果に基づいて進行を続け、その間に追跡が回復しない場合は追跡を中断、電動車いすをその場で停止させたうえで、アラーム音で先導する人物に知らせる。

- vii. i.に戻る。

図C-4-23に実際に追跡を行った実験の例を示す。

ここでは、人物まで0.8mの距離を保つよう設定している。(1)～(4)では先導する人物を追跡している。(5)では人物が立ち止まったため、停止した。続いて(6)で人物が車いすに向かって近づいたため、距離を保つため後退した。(7)～(11)では人物が周囲を回り込むように歩行したため、それに正対するように回転運動をし、(12)で人物が離れたため、背後を再び追跡した。

## D. 被験者実験結果

### 1. 方法

開発した電動車いすを評価するために、障害当事者を被験者として以下の要領でモニター評価実験を実施した。図D-1に実験風景を示す。

#### 1. 1 モニター評価手法

①実施場所：

場所：国立障害者リハビリテーションセンター研究所。

本実験に用いる車いす：開発機簡易電動車いす(インテリジェント車いす、以下開発機と呼ぶ) 1台 普通型簡易電動車いす(同普通機) 1台

実験方法：研究所屋内に仮設段差(高さ

2cm,3cm,5cm), 仮設スロープ (長さ 6m60cm 幅 2m 傾斜面長さ 5m), 障害物等を配した走行路を設置し, 被験者は電動車いすにてその走行路を走行する. 走行軌跡, 加速度, 主観評価により, 普通型簡易電動車いすと試作機との比較を行う.

## ②実験実施内容:

- 1 横傾斜路面での直進走行: 横斜面路上での走行偏差および走行軌跡を計測.
- 2 段差踏破: 角速度・加速度を計測
- 3 障害物・段差等危険回避: 被験者による試用. 壁面での回避を体験.
- 4 対人衝突回避: 被験者による試用. クランク走行路を試走.

## 1. 2 主たる評価項目

### ①身体評価について:

身体状況と車いすの操作などの特性については事前に聴取する. 基本的な身体評価は試用実施前に評価する. 関節可動域測定, 筋力, 四肢長, などを評価する.

### ②主観評価:

福祉用具満足度評価 (QUEST2.0), 福祉機器心理評価スケール (PIADS), アンケート・インタビューを用いる. アンケートの質問票を, 資料 D-1 にそれぞれ示す.

### ③車いす走行評価

走行軌跡: 動画撮影後, 画像処理システムにて走行軌跡を算出.

角速度・加速度: 三軸角速度・三軸加速時計を車いすに取り付け計測.

## 1. 3 モニターする当事者

Case1: 男性, 簡易電動車いす使用, 頸髄損傷による四肢麻痺者

Case2: 女性, 簡易電動車いす使用, 脳性麻痺者 (痙直型四肢麻痺)

Case3: 女性, 普通型電動車いす使用, 脳性麻痺者 (痙直型四肢麻痺)

Case4: 男性, 手動車いす使用, 水頭症・脳梗塞・頸椎症・視覚障害と聴覚障害合併者

## 2. 主観評価結果

### 2. 1 福祉用具満足度評価 (QUEST2.0)・福祉機器心理評価スケール (PIADS)

QUEST2.0 と PIADS による普通機と開発機についての評価結果を, 表 D-1 と D-2 にそれぞれ示す. QUEST2.0 では普通機が  $3.29 \pm 0.36$  pt (平均±標準偏差), 開発機が  $3.94 \pm 1.01$  pt, PIADS では普通機が  $15 \pm 51.42$  pt, 開発機が  $47.75 \pm 26.68$  pt であった. いずれのスケールでも開発機がより高いポイントを獲得したことは, 例数が少ないためさらなる検証が必要とされるものの, 本プロジェクトで開発した技術が当事者にとって有用であったことを強く示唆している.

### 2. 2 横傾斜路面での直進走行に関するアンケート

表 D-3 に, 横傾斜路面での直進走行に関するアンケート結果を示す. 安心感に対する評価は, 普通機が  $8.25 \pm 2.36$  pt, 開発機が  $8.5 \pm 1.29$  pt であり, 片流れ防止機構の心理的効果が示唆される結果となった. 一方で, 操作の容易さや操作性などの4つの項目で, 普通機が開発機のポイントを上回った. これは, 被験者が経験的に横傾斜面走行時の操作を体得しているため, 片流れ防止制御が逆に違和感

や不安感を生じさせたためと考える。今後、同機構を製品化していくためには、例えば適切な練習プログラムを提供するなど、ソフト面でのサポートが必要であると考え。また、モニター評価においても、慣れや習熟度を考慮した長期的な試験方法が必要であると考え。

### 2. 3 段差踏破に関するアンケート

評価実験では、開発機を用いた場合、4例中3例でより高い段差の踏破が可能となった。表 D-4 に、段差踏破に関するアンケート結果を示す。段差の高さへの不安は、開発機によって解消されたことがわかる。一方で、インタビューでは、段差踏破時の開発機特有の動きを不安視する声も聞かれた。

### 2. 4 障害物・段差等危険回避／対人衝突回避に関するインタビュー

障害物・段差等危険回避機能／対人衝突回避に関しては、機能を体験した後に、インタビューで印象を聞き取った。

#### [障害物・段差等危険回避]

機能自体に関しては前向きに受けとめられていたが、回避・停止に至る距離設定等に不満の声が聞かれた。

- 思っていたよりも手前で止まった。
- 普段は壁等を意識していないので（停止した時に）故障なのかと思った。

#### [対人衝突回避]

視覚・聴覚・四肢に重複障害を有する被験者による試用では、幅 120 cm のクランク走行路を完走可能なことがわかった（図 D-1, C 参照）。

- 簡易電動車いすに取り付け可能なら、日常生活で活用したい。

### 2. 5 車いす走行評価結果

図 D-4 に、傾斜スロープ走行時の普通機と開発機の走行軌跡をそれぞれ示す。普通型では、片流れによるずれが生じるたびに操作者が軌道を修正し、全体として蛇行した軌跡になっていた。一方、開発機ではこのような蛇行は見られず直線的な軌跡となっており、片流れ防止機構が機能したことがわかる。

段差踏破実験では、主輪乗り上げ時の動的特性に、普通機と開発機の間で大きな差が見られた。図 D-5 に、3 cm の主輪乗り上げ時のピッチ角速度と Z 軸加速度を、普通機と開発機についてそれぞれ示す。主輪が段差に乗り上げた際の角速度ピーク（グラフの時間軸 0～1 秒）は、普通機で 390 mdeg/s、開発機で 90 mdeg/s であり、およそ 4 分の 1 に低減された。また、主輪の乗り上げで浮いた前キャストが再接地した際の衝撃力（Z 軸加速度）も、ピーク値がおよそ 6 分の 1 に低減された。

以上の測定結果は、開発機が片流れの防止や段差の乗越えに有用であることを、客観的に示している。片流れ時に見られた細かいジョイスティック操作は、重度障害者には大きな負担である。上肢機能の残存度合いによっては、切り返し操作自体が困難であることも想定されるため、片流れ防止機構は重度障害者の操作性向上に資する技術であると言える。また、段差踏破実験では、開発機で踏破可能な高さが普通機のそれを全例で上回った。操作者が感じる恐怖感・不安感の主因である段差乗越え時の角速度・加速度が低減されたことが、安定した段差踏破を可能にしたと考える。

### 2. 6 被験者実験のまとめ

障害当事者 4 人を対象として、主観評価と

走行評価から成るモニター評価を実施し、以下の結果を得た。

主観評価では、QUEST2.0・PIADS 共に、開発機の評価が普通機のそれを上回った。また、アンケート調査でも、本研究開発で開発した技術がユーザの安全安心向上に寄与することが示唆された。一方で、i) 習熟を考慮した開発・評価手法が必要であること、ii) 安全制御における各種パラメータの最適化が必要であることなど、今後の課題が明確にされた。

走行評価では、開発機において、i) スロープ走行時の細かな切り返し操作が不要になること、ii) より高い段差の踏破が可能になること、iii) 段差乗越え時のピッチ角速度がおよそ4分の1に、Z軸加速度が6分の1にそれぞれ低減されること、などがわかり、本研究開発の有用性が定量的に実証された。

## E. ユーザからのヒヤリング及び現地調査

本研究開発では、試作機のスペック決定の参考とするため、1名のユーザに協力いただき、日常生活の中で実際に危険を感じた場面についてヒヤリングを行った。また、挙げられた事例が発生した現地（錦糸町駅周辺）の調査を行った。以下にその主な結果を示す。

- ヒヤリング対象ユーザ：男性、手動車いす使用、水頭症・脳梗塞・頸椎症・視覚障害と聴覚障害合併者
- バスターミナルなど、一段高くなっている島式のプラットフォームで側部から脱輪し、転倒、横転してしまう（3回程度経験した）。狭いプラットフォームに屋根の柱が立っており、特にそれを避けようとしたときに脱輪する。脱輪した先はバスが頻繁に走行しており、たいへん危険。

→ 現場の傾斜を測ったところ3.5°側方へ傾斜しており、それが転落の要因になっていると考えられる。またプラットフォーム上には柱、バス路線図・時刻表、ベンチなどが設置されており、これらに接触せず安全に移動することが難しい。

（図 E-1 (1)~(3)）

- 歩道走行中の片流れによる車道への進入の経験有り。事故にはいたらなかったが、クラクションを鳴らされた。危険性大。片流れはほとんど毎日経験する。

→ 現場の傾斜を測ったところ、最大9.8°の横傾斜があった。片流れで流される先は交通量の多い車道であり、極めて危険である。（図 E-1 (4)~(5)）

- 自宅前の段差解消スロープへの乗り上げ時に後方への転倒の経験有り。

→ 現場の寸法測定の結果、段差高95mm、最大傾斜15.2°であった。段差解消スロープが急角度であるため、乗り越え動作を行ったときに重心が一気に後方に偏り、後方に転倒したものと思われる。（図 E-1 (6)）

## F. 電動車いす安全研究会

### 1. 研究会の目的

本研究開発で開発した電動車いすの安全技術の普及には、多くの課題が存在する。一つはメーカー側の考え方であり、安全を担保する技術に責任をとることが難しいので、実用化に向けたハードルが高いという点である。また、利用者側の安全装置に対する認識も薄い可能性がある。そこで本研究開発では、電動車いすの安全装置普及に向けた課題抽出を目的として、電動車いすに関するステークホルダを一同に会し、研究会形式で議論を行う



こととした。

本研究会の概要を、表 F-1 に示す。研究会は計6名の講師を迎えて3回に分けて実施し、電動車いすの安全の考え方に関する一般知識、電動車いすメーカーの安全に対する取り組み、他分野の製品における安全の考え方について、講演と議論を行った。研究会メンバーの構成は、障害当事者・メーカー技術者・医療従事者・政府関係者・研究者であり、参加人数は計27名であった。

## 2. 各講演の要約

### ● 今西正義氏 (DPI 日本会議)

「障害当事者から見た電動車いすの安全」

・1979年に電動車いすが補装具化されたが、当時の性能では行動範囲は4～5キロと限られており、公共交通機関の利用も難しかった。1980年代から障害者の社会参加を進める意識が高まり始め、2000年の交通バリアフリー法施行を経て、車いす利用者の行動範囲は大きく広がった。

・電動車いすの発展を見ると、道路の走行のみを想定して開発がされてきたが、電車・バスなど公共交通機関を利用した使われ方は考えられていなかった。周辺環境も利用状況を考慮しながら整備されてきたように見える。道路に関しての安全対策はある程度達成されているが、公共環境・交通機関ではまだ対応が遅れている。

・安全を考えると、安全性が最優先になってしまい利便性を損ねるようなものは好ましくない。利用者にとっては利便性が第一であって、その上で安全を確保していくことが重要である。また、利用者の安全に加えて、第三者に対する安全確保も考える必要がある。

### ● 加藤弘氏 (経済産業省)

「ハンドル型電動車いすの安全対策」

・ハンドル形電動車いすの重大製品事故報告が続出したため、同車いすの安全基準に係るJISの改正整備とともに、平成20年6月に、同車いすを消安法の特定製品に指定することについて、消費経済審議会に諮問された。

検討の結果、事前規制を強めることにより、メーカーの生産撤退・縮小や輸入取り止め等により高齢者や障害者の選択肢の減少が懸念されたため、事前規制については当面見送ることとし、JIS改訂の反映状況やソフト面の対策を注視することになった。

・平成21年6月、10月に「ハンドル形電動車いす事故防止・安全対策にむけた関係者連絡会議」が開催され、同車いすの運転誤操作の防止に向けてソフト面の対策が議論され、事事例の更なる分析、原因究明／講習会の充実／試乗・利用開始時や一定期間利用後のチェック体制の強化／社会への啓蒙・宣伝活動の強化が、課題として挙げられた。

・ハード面の対策としては、ハンドル形電動車いすの新JIS規格が平成21年12月に制定、公示された (JIS-T-9208)。改正のポイントは下記3点である。

(1) 安全性の向上：手押し走行装置の追加／動的安定性能の要求／リスクマネジメントによる設計を追加

(2) 利便性の向上：鉄道での利用に配慮した回転性能の規定を追加

(3) 製品特性の表示を追加：旋回安定性、段差乗越え性、回転性能についてその性能に応じて星(★)数を表示

### ● 松山元昭氏 (スズキ)

「電動車いすの安全機構とメーカーとして

の安全対策への取り組み」

・「セニアカー」としてハンドル形電動車いすを製造している。操作性／被視認性に関する安全機構を有する。また、コーナーリング自動減速機能／握り込み緊急停止機能／手押し時走行不可機能／駐車ブレーキ作動時走行不可機能／走行中前後進切替レバー操作不可機能／アクセルレバー操作中電源スイッチを入れても走行しない／登坂警告・過負荷警告・過熱警告などの安全機能を有する。

・電動車いすに関連する法規には、道路交通法と消費生活用製品安全法の2つがある。前者では、定められた施行規則に基づき型式認定を取得する。後者では、重大製品事故報告・公表制度に則り、死亡事故／30日以上の治療が必要な事故／火災の3点に関して、国への報告義務を負っている。また、関連規格としては JIS T9208:2009 があり、JIS T9203:2006 からの改正に対応した。

・安全機構の装備に加えて、市場に出た後も全ての機能が正常に働くよう、新車点検・一年点検の実施を強化している。前者は無料で、全購入者に実施している。定期点検としての一年点検は有料だが、利用喚起のために、「お知らせアラーム」という機能を車両に搭載した。

● 後藤茂樹氏 (アイシン精機／本研究課題分担研究者)

「車いすの信頼性・品質確保と制御安全技術の開発」

・電動車いすの事故数はハンドル形の件数が多く、注目を集めているが、市場累積台数を考えるとジョイスティック形も安全とは言いがたい。事故事象を分析すると、転落・転倒・踏切が全体の 64 % を占めている。事故の

31 % は操作者に起因するものであり、本プロジェクトで解決を目指している部分である。

・事故原因の 28 % は車いすの破損・故障に起因している。アイシン精機では、設計時に FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) という手法を用いて、問題点を洗い出している。また、耐久性等に関しては、JIS 以外に自社オリジナルの基準を設けて開発を進めている。

● 小林純一氏 (日産自動車)

「先端技術を導入した制御安全システムの実用化」

・日産車の関わる死亡・重傷者数を究極的にはゼロにするという「Vision Zero」を目標に、安全技術の開発に取り組んでいる。事故を無くす技術には、自律型・協調型の2つのアプローチがある。前者は、センサ・アクチュエータを搭載した車が単独で危険を回避するタイプ、後者は他車・信号機などの交通インフラ・歩行者などと協調することで事故を無くしていく。

・安全技術の開発においては、事故事例の分析に重点を置き、開発戦略を策定している。死亡事故を防ぐような技術も重要だが、ドライバーが日常的に不安を感じているような状況を処理できるシステムも販売の面から見ると重要である。

・複数の安全機構が搭載されていると、情報をどのようにフィードバックするかというヒューマン・マシン・インターフェースの問題が生じる。アクセルペダルからの力覚フィードバックや、四輪独立制御による復元力生成など、感覚的にわかりやすい様々な操作支援法が開発されている。しかし、過度の支援はディストラクション・過信・誤解・不信といった安全リスクを生む可能性があり、適度な

支援を目指すべきである。

- 村田和弘氏 (ヤマハ発動機)  
「電動アシスト自転車の開発における安全設計の考え方」
  - ・1980年代の環境問題への意識の高まりを背景に、電動モータと人力を組み合わせた方式として、パワー・アシスト・システムが開発された。1994年に「電動ハイブリッド自転車」として発売して以来、市場は順調に成長し、現在では原動機付自転車の出荷台数を上回っている。
  - ・駆動補助機能の付加によって生じる安全リスクへの対策として、高速化の防止／誤動作・故障時のためのフェールセーフ／不正改造の防止／安全に運転するためのアシスト力制御、などの項目に配慮された設計となっている。
  - ・安全とは「受け入れ不可能なリスクがない状態」として定義される。そのため、消費者のマインドの変化に、メーカーは常に対応していく必要がある。その際、一企業での対策には限界があり、規格の統一化なども含め、業界団体全体で対応に当たるべきである。

### 3. 議論の内容

本節では講演後の議論を下記の4項目に分類してまとめる。

- ・安全技術全般
- ・フィードバック／操作介入
- ・メンテナンス／サポート／給付
- ・事故事例収集／分析

前半の2項目はハード面の議論、後半の2項目はソフト面で安全を如何に確保していくかという議論である。

### 3. 1 安全技術全般

メーカーと障害当事者にとって最重要の問題は機械的な信頼性であり、安全そのものを目的とした技術に対するモチベーションは高いとは言えなかった。

- ・「故障しない」ということが最低かつ最高の条件であり、実現に努力している。それ以上踏み込んだ部分にはなかなか手が回らない。(メーカー)
- ・ユーザが電動車いすに一番求めるのは耐久性。突然止まることを最も恐れている。(当事者)
- ・安全に対して金を出すという認識が低い。(当事者)

一方、本プロジェクトで開発している安全装置に関しては、次のような期待の声も聞かれた。

- ・操作がやっとなようなユーザの場合、安全が確保されれば寝たきりにならなくてすむかもしれない。(医療従事者)
- ・障害によっては自力で危険を発見することが困難な場合もあり、安全のための機能があると助かることは多い。(当事者)

また、実際に販売を考えたときの問題点としてメーカー側からは次のような指摘があった。

- ・現状の技術を(危険であると)否定することになりかねないので、「安全」ということを強調しづらい。
- ・安全にしたいと活動しても、それが逆手に取られることも考えられ、メーカーとしては慎重にならざるを得ない。

以上の議論を踏まえると、安全機能は必要だが、それを開発・製品化するには法的問題も含め社会環境の整備が不可欠であることがわかる。また、市場規模の小さい分野であることを考慮すると、開発の費用をメーカーのみで負担することは現実的ではなく、行政からの支援が求められる。

### 3. 2 フィードバック／操作介入

本プロジェクトで開発中の安全装置は、危険探知後に何らかの操作介入を伴う。日産・小林氏の講演でも述べられていたように、介入度合いの適切な設定は難しい。研究会ではユーザである当事者から、次のような意見が出た。

- ・安全なのはいいが、危険を察知してただ止まってしまうというのでは困る。
- ・現行の車いすでも、安全機構の誤作動に戸惑うことがある。
- ・単にアラーム等で危険を知らせるだけならば、マイナス面はあまりないので開発を進めて行って欲しい。

また、電動車いす以外の福祉機器開発者からも、同様に操作介入の難しさを指摘する声があり、今後の開発課題であることが確認された。

### 3. 3 メンテナンス／サポート／給付

電動車いすの安全な使用には、定期的なメンテナンスが欠かせない。しかし、それはメーカー側の一方的な認識であり、ユーザ側にその必要性が必ずしも浸透していないことがわかった。

- ・ユーザにとってはメンテナンスは限りなく無い方がいい。(当事者)
- ・有料の定期点検はユーザの負担になるのではないか。制度的なサポートは受けられないのか。(当事者)
- ・電動車いすの部品にも、どうしても経年劣化が避けられないものがある。(メーカー)
- ・法令点検ではなく、どうしても嫌だと言われれば仕方がない。法的な整備があれば、業界としても取り組みやすい。(メーカー)

現行の給付制度では、顕在化した故障に対する修理費用は支給されるものの、故障を事前に発見するための「点検」に対応する項目はなく、ユーザが点検を積極的に利用しない一因であると考えられる。一方で、ユーザの意識を変えるための啓もう活動が必要である、との声も挙がっていた。

- ・メンテナンスの必要性も含め、安全に対する考え方を定期的にユーザへ伝えていく機会が必要。(当事者)
- ・納車前に安全運転の指導などの講習会を開く、といった活動を始めている。(メーカー)

また、本プロジェクトで開発しているような安全装置の普及には、給付制度の整備が不可欠であることも指摘された。

- ・安全装置はすべてのものにつける必要はなく、対象者を適切に選んでいけばよい。そのときにネックになるのが給付されるかどうか。(医療従事者)
- ・あればいいという人でも自己負担になると「まあいいか」ということになり、普及しな

い。(医療従事者)

### 3. 4 事件事例収集／分析

日産・小林氏の講演でも強調されていたように、安全技術の開発には緻密な事件事例分析が不可欠である。しかし、利用者数がけた外れに違う自動車と比較して、電動車いすに関するの事例データは質・量ともに劣っている。

・アメリカには、Fatality Analysis Reporting System (FARS) や National Automotive Sampling System (NASS) といったデータベースがあり、豊富なデータにアクセスできる。

(日産・小林氏)

・電動車いすに関して、現在までに報告されている重大事故は30数件。ほとんどが単独事故で目撃者もない。(メーカー)

また、事故報告の体制についても次のような指摘があった。

・重大事故の報告だけではなく、ヒヤリハットレベルの情報も集まるような形が望ましい。(研究者)

このように、今後は安全技術の開発にとどまらず、重大事故以外の事例データを収集できるようなインフラを整備していくことが重要である。

### 4. 研究会に関するまとめ

電動車いすの安全装置普及に向けた課題抽出を目的として、安全技術研究会を開催し、ステークホルダによる議論を行った。その結果、課題として下記の点が抽出された。

- ・安全機能は必要だが、それを開発・製品化するには法的問題も含め社会環境の整備が不可欠である
- ・市場規模の小さい分野であることを考慮すると、開発の費用をメーカーのみで負担することは現実的ではなく、行政からの支援が必要である。
- ・安全装置を考える上で、操作介入の度合いは重要なパラメータとなる。
- ・安全装置の普及には、公的給付制度による支援が重要な要因となる。
- ・安全性向上には事故情報やヒヤリハット情報の蓄積が重要である。

一方で、自動車業界では、安全がお金になるという考え方が定着している。利用者の数や事故の重大さなど、電動車いすとの違いはあるもの、利用者も含めて社会全体での考え方の転換が普及に向けた重要なキーとなる。そのためにも、今回のような研究会は重要であり、もっと多くの人を巻き込んだ議論により、社会を動かす力となるような活動をさらに進めていく必要がある。

### G. 実用化に向けて今後残された課題

下り階段・段差転落回避技術に関しては、単純な段差については検知・回避可能であることは確認できたものの、実環境においては段差検知後の回避行動と停止行動の適切な判断が難しく、これに関しても被験者実験等を重ねることで、操作者の操縦意図を考慮した違和感のない危険回避技術を確立するのが今後の研究開発課題である。さらに、開発面では、現状はレーザレンジセンサの情報処理にハンドヘルドパソコンを用いているが、将来的にはその他の制御技術のようにマイコン上

への実装が必要になると考えている。

直進走行技術に関しては、模擬環境における技術検証は行ったものの、実環境における歩道走行時に見られるような、うねりのある複雑な路面状況での検証を行う予定である。さらに、電動車いすユーザによる被験者実験も行い、制御パラメータの最適化や主観的な操縦性能等が今後の研究開発課題である。

段差踏破技術に関しては、同じく実環境における実験や被験者実験を行う予定であるが、模擬環境においても転倒防止バーの電磁ブレーキが適切に解除されず、駆動車輪が空転することがある。スリップを検知し電磁ブレーキを解除するアルゴリズムの実装等が今後の研究開発課題である。

対人衝突回避技術および対人協調走行技術についても、同じく実環境における実験や被験者実験を行う予定である。対人協調走行技術においては、障害物が多い走行空間で衝突安全機能が働いてしまい、追跡を諦めてしまうケースがあった。衝突安全機能の安全と自由さのバランスの検討も含めて、今後実験及びモニター評価を繰り返す必要があると考えられる。また、電動車いすが自動／半自動移動する機能は、より多くのユーザがより快適に移動するために重要な技術であるが、一方で万一事故が発生した場合の責任の所在などについて、今後更に議論を深め、社会的なコンセンサスを形成していく必要があると考えられる。

## H. 結論

本研究開発では、社会的な問題となっている電動車いすの安全をテーマとし、技術開発の立場から解決策を提案した。

本研究開発では、電動車いすの操作者に起

因する危険性を軽減する（下記①、④に対応）とともに、機械側が安全性の多くを担うことで自立移動の可能性を広げる（下記②、③、⑤に対応）ことを目指し、全方向ステレオカメラ、レーザレンジセンサ、加速度計、ジャイロ等の各種センサを用いた転倒・転落・衝突回避機能等を電動車いすに付加し、指定課題に対応した、

①障害物・段差等危険回避技術

②段差踏破技術

③直進走行技術

④対人衝突回避技術

⑤対人協調走行技術

をそれぞれ実現した。研究期間内にこれらの機能を実装した試作機を開発し、ユーザによる実証試験を行った。実証実験では主観評価と走行評価から成るモニター評価を実施し、本研究開発の有用性を定量的に実証すると同時に、アンケート調査でも、本研究開発で開発した技術がユーザの安全安心向上に寄与することが示唆された。また、i) 習熟を考慮した開発・評価手法が必要であること、ii) 安全制御における各種パラメータの最適化が必要であることなど、今後の課題についても明確にされた。

本研究開発ではまた、当該技術に関係するステークホルダ（利用者、企業、医療専門職、福祉機器専門家、技術開発専門家等）を集め、研究会形式でその実用化・普及にむけた課題の抽出を行った。そこにおいては、安全機能を技術的な観点から高めていくことはもちろん重要であるが、製品化・普及のためには法的問題も含め社会環境の整備が重要であり、まさに今回設定した研究会のような議論の場を今後も設け、議論を続けていくことが必要である旨が指摘された。

今後は、本研究開発によって抽出された実用化に向けた諸課題の解決に取り組む。具体的には、G. で述べた各課題を解決するための研究・開発とユーザによる実証実験というサイクルを繰り返すことにより、スパイラルアップで安全性・信頼性を高めていく。

#### I. 研究発表（発表予定）

- ・日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会（ROBOMECH2010, 2010年6月）「簡易型電動車いすの斜面走行・段差踏破支援技術に関する研究」
- ・第25回ハ工学カンファレンス（2010年8月）「多種センサ技術を活用した安全で安心なインテリジェント電動車いすの開発」
- ・第25回ハ工学カンファレンス（2010年8月）「操作介入を伴う安全装置を搭載した電動車いすの臨床評価」

#### J. 知的財産権の出願・登録状況

なし。

#### 参考文献

- [A1] 電動車いす出荷台数の推移, 電動車いす安全普及協会  
<http://www.den-ankyo.org/transition.html>, 2009年7月27日更新, 2009年12月26日確認.
- [A2] 平成19年度ハンドル形電動車いすの安全性調査報告書, 独立行政法人製品評価技術基盤機構.
- [C1] 安田国弘, 富沢哲雄, 松尾清史, 川田浩彦, 李在勲, 角保志, 大場光太郎, "つくばチャレンジ2008における自律移動ロボットの開発-HOIST2のシステム構成とナビゲーション手法-", 日本機械学会ロボティクス・メ

カトロニクス講演会'09, 福岡国際会議場 (2009.5) .

[C2] C. E. Brubaker, et al. "Effect of side slope on wheelchair performance," Journal of Rehabilitation Research and Development, Vol.13, No.2, pp.55-57, 1986.

[C3] M. Isard and A. Blake, "CONDENSATION -- conditional density propagation for visual tracking", Int. J. Computer Vision, 29, 1, 5--28, 1998.

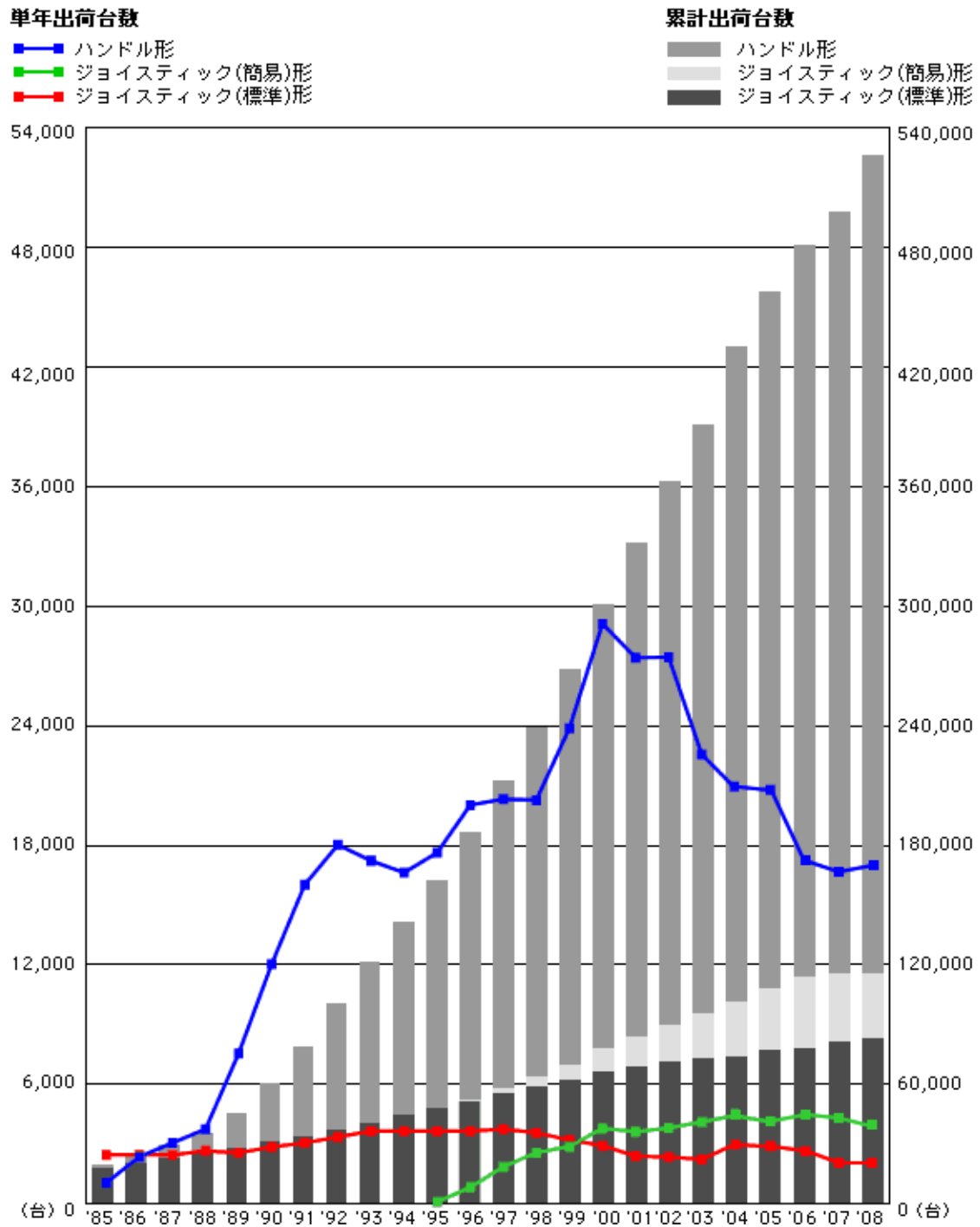


図 A-1 電動車いすの出荷台数の推移[A1]



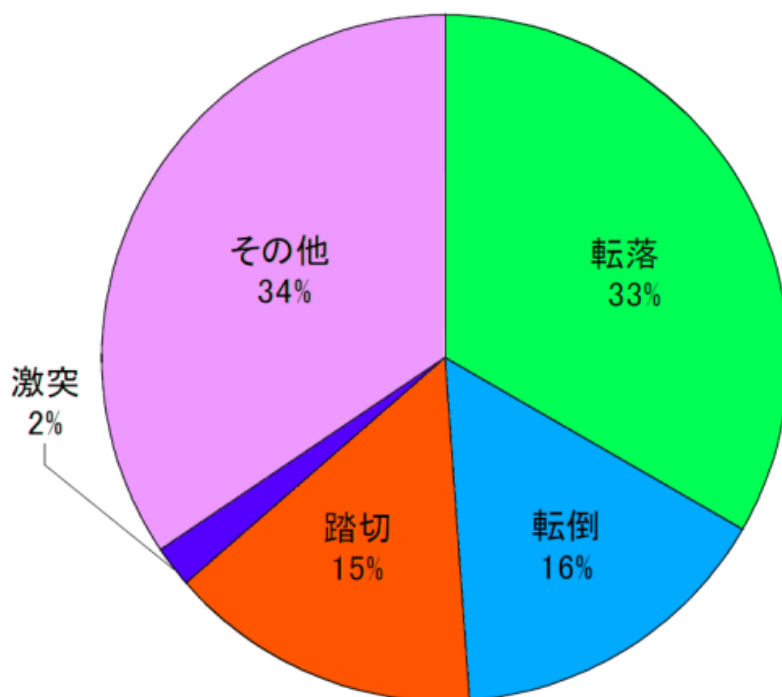


図 A-2 事故事象別事故分類[A2]

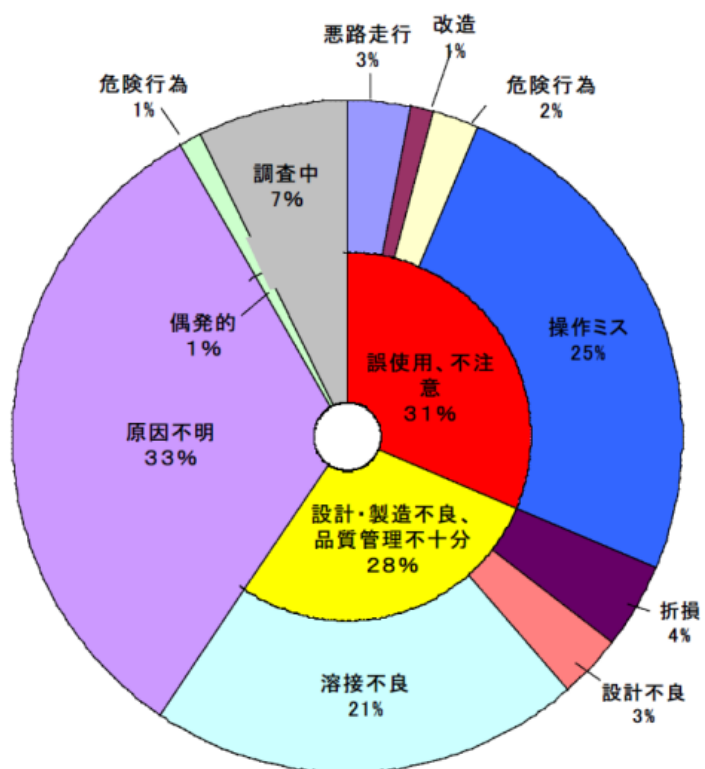


図 A-3 事故原因別分類[A2]

## 被験者としての研究参加のための説明書 (産総研にて行う健常者の方を対象とした実験用)

### この研究について

1. 研究課題名: 安全に配慮された電動車いす

#### 2. 研究実施者

研究代表者: 佐藤 雄隆(産業技術総合研究所 情報技術研究部門 研究員)

実験担当責任者: 佐藤 雄隆(産業技術総合研究所 情報技術研究部門 研究員)

実験従事者: 実験に従事する者を全て記載.

#### 3. 実験の期間

この実験は、産業技術総合研究所において全期間が平成21年 xx 月 xx 日から平成22年3月31日までの期間で実施する予定です。

#### 4. 研究の背景

社会的な問題となっている電動車いすの安全性向上のために、走行環境の危険や電動車いすの走行状態を的確に察知するセンサ技術を活用したインテリジェント電動車いすを開発します。これにより、当事者の方がより安全で安心して電動車いすの操作を行うことが可能となり、自立移動の促進に寄与します。

#### 5. 実験の目的と方法

開発したインテリジェント電動車いすについて、有用性、使い勝手、使いやすさ、便利さ、を評価していただくことが本実験の目的です。具体的には開発した電動車いすの試用実験をおこなって頂き、主観評価(アンケート, インタビュー)および心理評価(QUEST(満足度), PIADS(心理的な効果))にご協力いただきます。また、実験中の電動車いすの動作データを記録いたします。

実験にかかる時間は評価を含めて3時間程度を予定しています。疲労を感じた場合はいつでも休憩、または実験を中止できます。実験従事者にお申し出下さい。いずれの実験も、万一に備え、電動車いすには緊急停止ボタンを被験者の方からも実験従事者からも押しやすい位置に設置しています。さらに、実験従事者は常に側にいて、転倒や衝突しそうになった場合はすぐに近寄り転倒・衝突を防ぎます。

##### ①段差踏破補助実験

図1に示すようなインテリジェント電動車いすの段差踏破補助機能で、段差(2cm, 3cm, 4cm, 5cm)を低速で通過していただきます。インテリジェント電動車いすは、車いす後部に設置されたブレーキ制御付きの転倒防止バーによって、通常よりもショックが少なく安定に段差を乗り越える機能を有します。

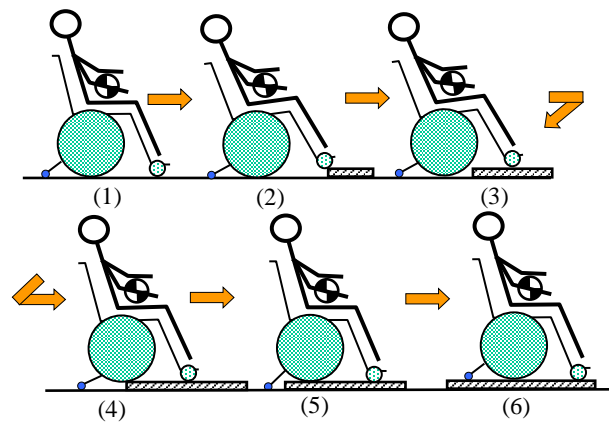


図1 段差踏破実験

## ②直進走行補助実験

インテリジェント電動車いすの直進走行補助機能を使って、図2に示すような緩やかなスロープ上を走行していただきます。インテリジェント電動車いす、コンピュータが路面の傾斜を自動的に補正することにより、ジョイスティックを直進方向に倒すだけで容易に直進が可能となる機能です。

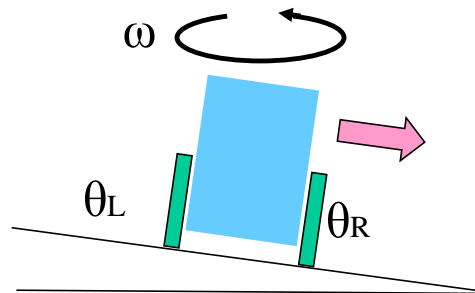


図2 直進走行補助実験

## ① 差・障害物回避実験

② インテリジェント電動車いすの走行環境危険回避機能を使って、図3に示すような段差（5～20cm）や下り階段、走路上に家具などの障害物がある環境（すなわち実際の生活環境に準ずる環境）で走行していただきます。電動車いすに危険が及ぶと判断される場合に（1）自動的に減速・停止する、（2）自動的に安全な方向に方向転換する、機能になります。（1）と（2）のそれぞれについて評価していただきます。



図3 生活環境中の段差

## ④対人安全機能に関する実験

インテリジェント電動車いすの対人安全機能を使って、図4で示すような数名の実験従事者が周囲にいる環境で、直進・後退・方向転換等を行っていただきます。人に近づくと（1）電動車いすが自動的に音を発し周囲の人に注意を促します。さらに人と衝突するなどの危険が及ぶと判断される場合に、（2）自動的に減速・停止する、（3）自動的に安全な方向に方向転換する、機能になります。（1）、（2）、（3）のそれぞれについて評価していただきます。