

ドローンを用いたウェアラブルな歩行牽引デバイスの構築

高田 峻介^{1,a)} 山田 渉² 真鍋 宏幸² 志築 文太郎³

概要: ヘルメットを介してユーザの頭部に装着したドローンによる、ウェアラブルな歩行牽引デバイスを構築した。これまでの視覚や触覚等による歩行誘導と異なり、本デバイスはユーザを直接牽引できる。具体的には、ユーザに対する牽引力および牽引方向をドローンの推進力および推進方向によって制御することができ、方向については前後方向と左右方向の提示が行える。本デバイスでは人間の移動時における主体性が人ではなくドローン側にあり、かつ牽引力を生じているのもドローンである点から、歩行における自動運転デバイスになり得る。また、他の歩行における自動運転を行う手法に比べて、本デバイスは頭部装着型であることを特徴とする。

1. はじめに

歩行は最も基本的な移動手段である。ただし、歩行の際には、側溝や人、電柱といった障害を避けるように歩くなど、周囲の環境に配慮する必要がある。一方、近年、スマートフォンを操作しながら歩行する「歩きスマホ」が問題となっている。歩きスマホ中のユーザはスマートフォンの小さな画面に集中してしまう。この結果、周囲が視界に入っているにも関わらず何が起きているか分からない「非注意性盲目」という状態に陥るため、事故を引き起こしやすく、また事故に巻き込まれやすい。そのため、この歩きスマホを防止する手法がこれまで提案されてきた [10, 12]。

しかし、SNS の普及により逐次的な返信や写真等の投稿が当たり前となり、街中で歩行している際中であっても SNS アプリケーションを利用したいという欲求や、あるいは歩行中の時間を情報収集に利用することにより、時間を有効活用したい等の欲求から、歩きスマホをやめさせることは難しい。

そのため、歩きスマホをやめさせるのではなく、人が周囲に配慮せずとも安全に歩行を行う手法があれば、この歩きスマホの利便性を損なわずに、歩行を行うことができる。そこで周囲の環境等の情報を基に歩行を外力によって制御

する、いわば歩行における自動運転システムが求められる。

我々は、この自動運転デバイスを構築するための手段としてドローンを用いたウェアラブルな歩行牽引デバイスを構築した。本稿にて、構築した歩行牽引デバイスを述べる。

2. 個人の移動手段

目的地に達するための移動手段の内、公共交通ではない個人的な移動手段には、自動車、自転車、歩行などがあり、移動中にはナビゲーションシステムを用いる場合がある。この内自動車においては、近年自動運転車が市販化されるなど、自動運転デバイスの普及が進んでいる。本稿において、このような人が移動の際に利用する自動車やナビゲーションシステム等の外部装置を総称してモビリティと呼ぶことにする。我々は自動車において、手動運転や運転アシスト、自動運転等においてユーザと自動車のどちらが主体性を持って移動を行っているか、図 1 に示すモデルを構築した。次に、構築した移動の主体性モデルを歩行に適用した場合、これまでの歩行支援手法がモデルのどの段階に位置するかを示し、本研究の立ち位置を示す。そして、移動の主体性モデルにおいて本研究と同様の位置に属する手法と比較した際の本研究の利点を述べる。

2.1 自動車におけるユーザとモビリティの主体性

自動車における移動の主体性がユーザとモビリティのどちらにあるかを考察し、どちらが主体的に移動を行っているかを六段階に分類した。図 1 に分類した移動の主体性モデルを示し、以下に自動車におけるモデルの適用例を述べる。

手動 手動運転の場合、ユーザは自ら信号や他の車の位置

¹ 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

² NTT ドコモ先進技術研究所

NTT docomo Research Laboratories

³ 筑波大学システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

a) rtakada@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

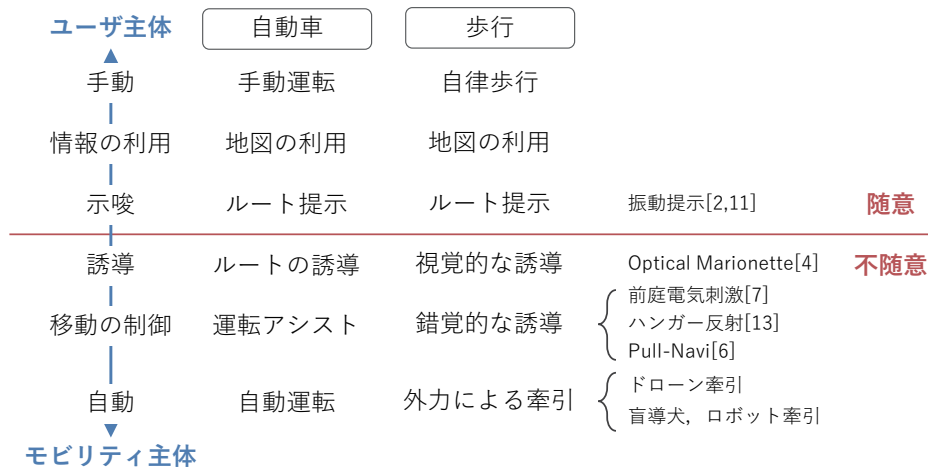


図 1 自動運転および歩行における移動の主体性モデル

といった周囲の環境を認識し、その環境の情報と目的地の情報に基づきハンドルを操舵し、自動車を運転するため、ユーザが主体となって移動していると言える。

情報の利用 ユーザが地図を用いて周辺環境の情報を利用したとしても、事前に目的地までや道路情報を道のりを記憶する必要がなくなっただけであり、あくまで、ユーザが主体となって移動していることには変わりはない。

示唆 一般的なカーナビゲーションシステムの利用シーンでは、ユーザが入力した目的地と交通状況等を基に推薦されたいくつかのルートがユーザに示唆され、ユーザはそこから好みのルートを選択し、ルートに沿って移動するシーンが多い。このシーンにおいて、ユーザは道のりを計画する必要がなくなり、周囲の環境の認識およびハンドルの操舵により専念できるようになった。また、カーナビゲーションシステムに示唆されたルートを参考にハンドルの操舵を行うのはユーザであり、移動の主体性はユーザにあるといえる。

誘導 示唆におけるルート提示において、例えば意図的に特定の場所を通るようなルートを提示することにより、カーナビゲーションシステムが暗にユーザが移動するルートを誘導することが可能である。そういった場合において、モビリティ側が自身で移動ルートを決する権限を持つことができる（モビリティ側が移動の主体性を持ち始める）。ただしカーナビゲーションシステムによって提示されるルートは、あくまでユーザは参考にするのみであり、ユーザはその情報を受け入れるか、意識的に選択できる。

移動の制御 運転アシストが導入された自動車を考察する。現在市販されている一部の自動車には、道路の車線からはみ出した際にユーザに警告する機能や、車線からはみ出さないように暗にハンドルの操舵を行う機能が搭載されている [9]。こういった運転アシストは、も

ともとユーザに依存していた周囲の環境の認識やハンドルの操舵にまで、モビリティが影響を与えており、ユーザとしては環境に応じた判断の必要性が下がったといえる。こういった運転アシストを分類すると、周囲の環境を基にユーザに警告や情報を提示する誘導を行う運転アシストと、ハンドルやアクセル、ブレーキといった物理的な操舵にまで影響を及ぼす移動の制御を行う運転アシストに分類される。後者の場合、モビリティがユーザに与える影響は大きく、ユーザのハンドルの操舵よりもモビリティの操舵が優先されることから、モビリティ側が場合によってはユーザよりも主体性を持って移動していると言える。

自動 自動運転車の場合では、ユーザは周辺環境の認識、目的地までのルートの決定、ハンドルの操舵といった運転を全てモビリティ側に依存することとなり、移動の主体性はモビリティにあると言える。移動の制御まではユーザが自動車を動かさずにブレーキをかけている場合に、自動車が動くことは無いが、自動運転の場合、ユーザが自動車を止めたいという意思に依らずに自動車を動かすことが可能である。

2.2 歩行における移動の主体性モデルおよび本デバイスの立ち位置

前節にて述べた移動の主体性モデルを歩行に適用した場合を述べる。

手動、情報の利用 本モデルにおいて、歩行の場合でも手動および情報の利用の段階は自動車の場合と共通している。

示唆 このモデルの内、歩行者にルートの示唆を行う手法として、振動力覚を提示する手法が提案されている [2,11]。振動力覚はユーザの皮膚に対して振動を与えることにより、特定の方向に対して引っ張られる錯覚を提示することができる。ただし振動力覚による提

示は、実際に牽引力が発生している訳ではないため、ユーザはその錯覚を歩行ルートの参考にする程度にとどまる。

誘導 歩行中のユーザを視覚的に誘導する手法として Optical Marionette が挙げられる [4]。Optical Marionette は人の目と周囲の環境の間にカメラ及びヘッドマウントディスプレイ (HMD) をいれ、ユーザの意図した方向とは別の方向に歩行を誘導する手法である。Optical Marionette では、カメラに写っている映像をユーザに気付かれないようにずらしながら HMD に写すことにより、ユーザが意図した方向とは別の方向に歩行を誘導することができる。この視覚的な誘導手法では、周囲の環境情報がモビリティによって改変され、それによりユーザが正しく進んでいると思っているのにも関わらず、暗にモビリティが意図したルートに沿って歩かされるため、モビリティ側がある程度主体性を持っていると言える。しかし Optical Marionette では、歩行の際にユーザが周囲の環境を認識し、進む、止まるといった歩行自体はユーザ自身が制御しているため移動の制御とはならない。また、ユーザは周囲の環境を視覚的に認識する必要がある。

移動の制御 歩行において移動の制御を行う手法を述べる。前田らは前庭電気刺激を与えることによりユーザの平衡感覚を制御し、歩行方向を制御する手法を提案している [7]。今後は、ユーザの頭や腰に皮膚がせん断方向に変形するように力を与えることにより、ハンガー反射を発生させユーザの向きを変える手法を提案している [13]。Pull-Navi はユーザの耳を引っ張ることにより、ユーザに方向を提示する手法である [6]。これらの手法は人の触覚を刺激することにより、デバイス側が意図した方向にユーザの身体を動かし、制御することができる。Optical Marionette と異なり、これらの手法ではユーザは周囲の環境を見ずとも、目的地に向かって移動することが可能である。しかし歩行方向をずらしたり旋回させることはできるが、ユーザの動きを止めたい場合や、細かい歩行方向の制御は難しい。

自動 外力による歩行牽引は、従来より例えば聴覚障がい者などの歩行において、盲導犬や誘導者が腕を引く手法が広く用いられていることから一般的であり、直接的にユーザに外力を加えることができるため、緊急時にユーザの歩行を止めるといった制御も可能となる。また外力による牽引は、ユーザが歩行を止めている場合でも、歩行させることができる点から、モビリティが移動の主体性のほとんどを占めているおり、歩行における自動運転に位置する。そのため我々の手法は、ドローンを用いて外力を発生させユーザを牽引できる点から歩行における自動運転を行う手法である。

2.3 歩行における他の自動運転

ドローンを用いた牽引以外にも、移動の主体性モデルにおいて歩行の自動運転となりうる手法がいくつか考えられる。例えば紐をつけたロボット掃除機や、二足歩行ロボット等を用いてユーザの腕を牽引する場合である。これはすでに一般的に行われている盲導犬や誘導者が聴覚障がい者の腕を引く手法を、ロボットを用いて代替する手法である。これらの手法にて、ユーザの腕や手を牽引に利用した場合、ユーザがハンズフリーではないため、例えばユーザが歩きスマホを行いながら牽引することは難しい。しかしユーザの頭や腰とロボットを紐で接続した場合は、ユーザはハンズフリーである。ただし接地型のロボットを用いるため、道路状況の影響を受けやすいデメリットがある。一方、本手法は非接地型であるため道路の影響を受けにくい。

また、脚部装着型のロボットアシストスーツを装着し、スーツを駆動させることによりユーザの足を動かす場合も、歩行の自動運転となりうる。ロボットアシストスーツを用いた場合、水平方向の面積が増えにくいいため、街中で用いたとしても人や電柱に衝突しにくいメリットがある。しかしスーツの重量の影響や、膝の関節部が受けるスーツの関節部による影響のため、ユーザの歩行への負担が大きくなる。一方ドローンを用いる場合、ドローンに上方向の推進力を常に発生させることによりユーザにデバイスの重量を感じさせず、またユーザの脚部に制約が発生しない利点がある。

3. 関連研究：ドローンを用いた力覚提示

これまで、ドローンを用いたユーザへの力覚提示手法が示されてきた。BitDrone は複数の発光するドローンを飛行させ、3D ディスプレイとして利用する手法である [3]。飛行しているドローンを押すことにより、3D モデルの位置を変えることができるため、3D モデルの力覚提示を行っているといえる。HapticDrone はドローンをユーザの手に装着することにより、HMD に表示した 3D モデルに触れた際の力覚を提示する手法である [1]。TactileDrone は飛行するドローンを用いて、ユーザの HMD に映されている 3D モデルに触れた際の力覚を提示する手法である [5]。Yamaguchi らは飛行するドローンを用いて、ユーザが把持している棒がユーザの HMD に映されている 3D モデルに触れた際の力覚を提示する手法を示した [8]。これらの手法は、ドローンを 3D モデルに触れた際の力覚提示に用いているが、本手法はドローンが発生させる力覚をユーザの歩行牽引に用いる点で異なる。

4. ドローンを用いた歩行牽引デバイス

構築したドローンを用いた歩行牽引デバイスを示す。また、本デバイスを使用した際の使用感を確かめるための調査を行った。最後に本デバイスの他の活用方法を述べる。

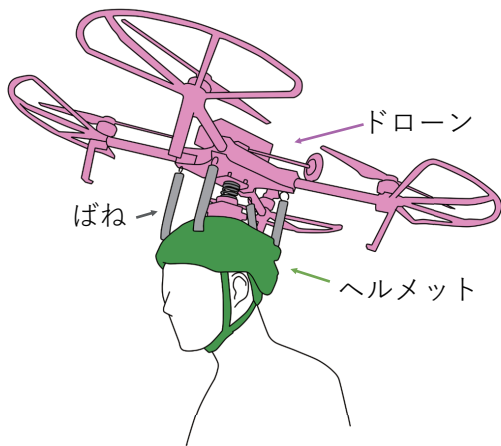


図 2 実装した歩行牽引デバイス

4.1 実装したデバイス

図 2 および図 3(a) に実装した歩行牽引デバイスを示す。本デバイスは図 2 のようにユーザを牽引するための推進力を発生させるドローン、ユーザが装着するためのヘルメット、およびこれらを接続するためのばねから構成される。ドローンには DJI 製 Matrice100 (重量 2.4kg, 有効搭載量約 1kg) を用いた。

ばねはデバイスの中心部に 1 個、周囲に 4 個の計 5 個用いている。本デバイスにてドローンおよびヘルメットの接続にばねを用いているのは、ドローンが前後左右への推進力を発生させた場合に、ばねが湾曲しドローンが傾く構造にするためである。この構造により、最も強くなるよう制御されている垂直方向へのドローンの推進力を、牽引したい方向に向けることができるので、より効果的に牽引力をユーザに提示できる。周囲のばねは必要以上にドローンが傾き、ユーザに接触することを防ぐためのものである。ばねおよびヘルメット、もしくはばねおよびドローンの接続部は、3D プリントを用いて印刷したものである。なお接続部の印刷にはナイロン素材を用いた。またヘルメットがずれないように、あご紐および後頭部用のベルトが付いたヘルメットを用いた。デバイスの重量は 3.3kg である

4.2 使用感調査

実装したデバイスを用いて、著者 1 名を被験者とした使用感調査を行った。実験ではデバイスを被験者に装着し、被験者が立ち止まっている場合、および歩行している場合にドローンの推進力を発生させ、どの程度の牽引力が発生するかを調査した。ドローンの操作は、実験協力者 (研究室の学生) 1 名が行った。また本実験は、他に誰もいない屋内にて行われた。実験の所要時間は約 20 分間であった。

4.3 使用感および考察

著者が本デバイスを使用した際の使用感について述べる。

デバイスの重量 ドローンを駆動させずに、デバイスを装着している状態では頭に重みを感じ、首を傾けるとばねが曲がりドローンも併せて傾くため、より重みを感じた。ドローンを駆動し始めると、デバイスの重量がドローンの推進力によって相殺されることに伴い、頭にかかる重みはほとんど感じなくなった。

前後左右への牽引 ドローンを動かしながら前後左右に傾けた際に、立ち止まっている、あるいは歩行中のどちらの場合でも牽引された。最大推進力にて頭上方向に牽引した際に、まず頭全体が持ち上がり、その後頭につられるようにして体全体が伸びていった。前後左右の牽引においても同様に、ドローンの牽引によって頭が傾くことにより、よりその方向への牽引力が強くなるため、上半身が引っ張られるような感覚を覚え、最後に脚が体の傾きに耐えられなくなり動き出してしまった。このことから、本デバイスは十分に歩行牽引を行えることが分かった。

操作と牽引の関係について ドローンが前後方向への推進力を発生させた場合は、前後への牽引力を感じた。一方、左右への牽引の際に、ドローンのコントローラを左右に傾ける操作では牽引されず、ドローンを旋回させる操作の際に左右に傾くことが分かった。(左旋回の場合：左方向への牽引)

音 ドローンが駆動している間、プロペラの回転によって生じる音が大きく、周囲の音が聞こえにくくなってしまった。また推進力が強くなるほど音が大きくなった。

4.4 デバイスの発展案

本デバイスの発展案を述べる。

連結部の接続/解除 ドローンおよびヘルメットの連結部が任意に接続あるいは接続の解除が可能であれば、本デバイスによる牽引力提示では間に合わないほどの緊急の事故時に、一時的に連結部の接続を解除することができる。そして、接続を解除したドローンをユーザの周囲に移動させることにより、ユーザの歩行を止めるための注意を促すことが可能となる。

複数機のドローンの利用 ドローンを 1 機のみでなく複数機利用する場合を考える。この場合、ユーザを牽引しているドローンのバッテリーが切れる前に、頭部のドローンを切り離し、他のバッテリーが充電されたドローンに切り替えることが可能である。

紐状の連結部 ドローンおよびヘルメットを紐状の連結部を用いて接続し、牽引しない場合は紐がたわむようにユーザの周囲にてドローンを飛行させることにより、ユーザにドローンの重量や牽引力を提示しないことが可能である。牽引する場合は紐が引っ張られるようにドローンを飛行させればよい。

さらに、複数機のドローンを用いて、紐状の連結部

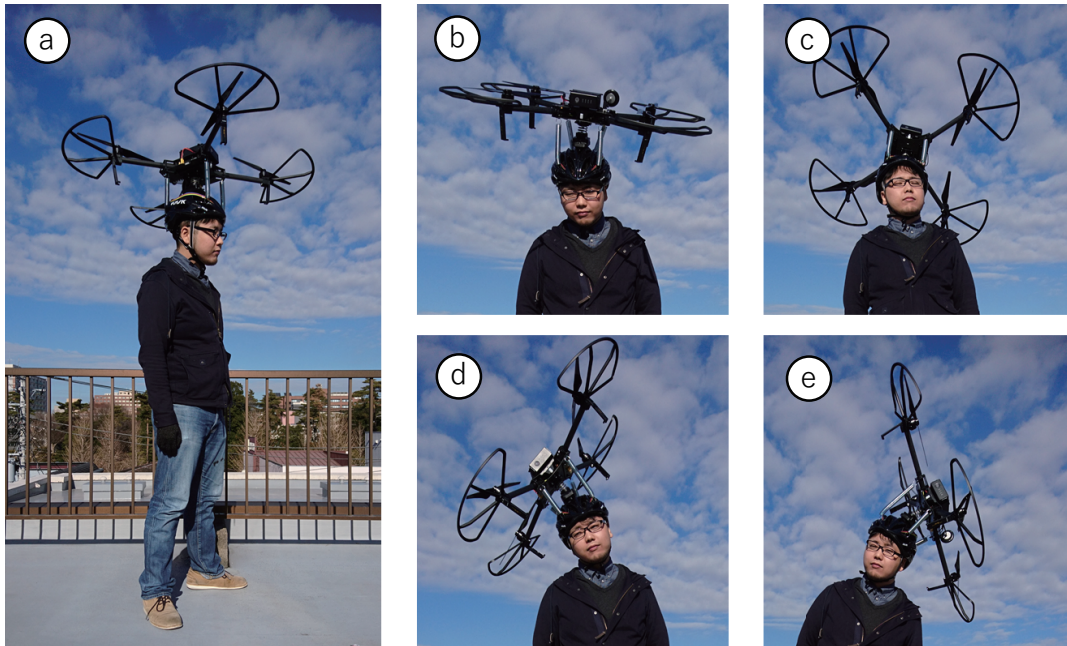


図3 歩行牽引デバイスの全体図および牽引時の様子，(a) 全体図，(b) 前方向牽引，(c) 後方向牽引，(d) 右方向牽引，(e) 左方向牽引

を介してユーザの頭部に接続することにより、複数機のドローンを用いた歩行牽引が可能となる。このとき、ユーザに提示される牽引力はそれぞれのドローンが発生させる牽引力を合成したものとなる。したがって、1機のみを用いる場合に比べてより強い牽引力を発生させることができる。また、3機のドローンが接続されている場合、そのうち1機のドローンが故障し誤った方向に牽引した場合でも、他の1機がそれを相殺する方向に牽引し、残りの1機がユーザを正しい方向に牽引することができる。

頭部以外への装着 ドローンを頭部以外にも腕や、紐状の連結部を用いて胴と接続することにより、歩行牽引を行うことができる。

5. 未来ビジョン

本デバイスが普及するために検討すべき課題、および本デバイスの応用の可能性を述べる。

5.1 事故の防止

本デバイスを街中にて利用することを想定すると、様々な安全策が必要となる。プロペラの羽根に人が接近したことを認識し、自動的にプロペラを止める機能が必要である。また、プロペラ自体をまるごと囲うようなガードを併用することにより、プロペラの接触による事故を減らすことができる。プロペラによる騒音は、二重反転のプロペラを用いることにより騒音を打ち消す方法が考えられる。さらに、ドローンが人や電柱と行った障害物に衝突しそうになった場合は、衝突による衝撃によりユーザに負荷をかけ

ないように、一時的にドローンが接続を解除し、障害物を回避することにより解決できる。障害物への衝突を避けるために、より小型のドローンを使用することも考えられる。

5.2 首への負担

本デバイスではユーザの頭を傾けさせるため、首への負担がかかる問題がある。この問題を解決するために、推進力を加減したり、デバイスを軽量化することが考えられる。さらに、ユーザの首への負担を避けるために傾け角度が急速に変化しないように制御する方法が考えられる。

5.3 歩きスマホにおける利用

歩きスマホは、事故の危険性が増すため危険であるが、本デバイスが周辺環境を認識し、自動的に障害を回避するようになった場合、本デバイスを装着しているユーザは、歩きスマホをしながら事故を引き起こさず、また事故に巻き込まれずに目的地まで歩行することが可能となる。これにより、ユーザは歩行中の時間をSNSの利用や情報収集に役立てられる。

5.4 身体能力の拡張

本デバイスの牽引力をユーザの運動に同調させることにより、ユーザの身体能力を拡張することが可能となる。例えば、跳躍時に上方向に牽引することにより、通常より高く跳躍することが可能となる。他にも体をひねる際に、旋回方向の牽引力を発生させることにより、通常より速く体を回転させることができる。

5.5 人と環境のインタラクションの補助

本デバイスは、元来ユーザが配慮すべきであった周囲の環境を、デバイスが代わりに配慮し、回避や目的地までのルートの設定等を行うことができるようになるれば、ユーザはデバイスとのインタラクション（本デバイスの場合、ドローンが発生させる牽引力に従って歩くこと）を行うだけで、周囲の環境を配慮することができる。これにより、ユーザがやらざるを得なかった環境との直接的なインタラクションの必要性が減り、ユーザがうっかりしている場合でも安全に歩行を行うことができる。

6. おわりに

本稿にて自転車ならびに歩行における移動の主体性をモデル化し、本研究の立ち位置を示した。また頭部装着型の歩行牽引デバイスを示し、本デバイスを利用した際の使用感の調査を行った。本デバイスは、ユーザが周囲の環境に配慮せずに目的地に向かって歩くことが可能な。歩行における自動運転システムの構築に利用できる。今後は本デバイスによってどの程度歩行を牽引することができるか評価を行う予定である。

参考文献

[1] Abdullah, M., Kim, M., Hassan, W., Kuroda, Y. and Jeon, S.: HapticDrone: An Encountered-Type Kinesthetic Haptic Interface with Controllable Force Feedback: Initial Example for 1D Haptic Feedback, *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 115–117 (online), DOI: 10.1145/3131785.3131821 (2017).

[2] Amemiya, T. and Gomi, H.: Buru-Navi3: Behavioral Navigations Using Illusory Pulled Sensation Created by Thumb-sized Vibrator, *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '14, New York, NY, USA, ACM, (online), DOI: 10.1145/2614066.2614087 (2014).

[3] Gomes, A., Rubens, C., Braley, S. and Vertegaal, R.: BitDrones: Towards Using 3D Nanocopter Displays As Interactive Self-Levitating Programmable Matter, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 770–780 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858519 (2016).

[4] Ishii, A., Suzuki, I., Sakamoto, S., Kanai, K., Takazawa, K., Doi, H. and Ochiai, Y.: Optical Marionette: Graphical Manipulation of Human's Walking Direction, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 705–716 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984545 (2016).

[5] Knierim, P., Kosch, T., Schwind, V., Funk, M., Kiss, F., Schneegass, S. and Henze, N.: Tactile Drones - Providing Immersive Tactile Feedback in Virtual Reality Through Quadcopters, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 433–436 (online), DOI: 10.1145/3027063.3050426 (2017).

[6] Kojima, Y., Hashimoto, Y., Fukushima, S. and Ka-

jimoto, H.: Pull-navi: A Novel Tactile Navigation Interface by Pulling the Ears, *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '09, New York, NY, USA, ACM, pp. 19:1–19:1 (online), DOI: 10.1145/1597956.1597975 (2009).

[7] Maeda, T., Ando, H., Amemiya, T., Nagaya, N., Sugimoto, M. and Inami, M.: Shaking the World: Galvanic Vestibular Stimulation as a Novel Sensation Interface, *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, ACM, (online), DOI: 10.1145/1187297.1187315 (2005).

[8] Yamaguchi, K., Kato, G., Kuroda, Y., Kiyokawa, K. and Takemura, H.: A Non-grounded and Encountered-type Haptic Display Using a Drone, *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 43–46 (online), DOI: 10.1145/2983310.2985746 (2016).

[9] トヨタ自動車株式会社: レーンキーピングアシスト, http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/lka.html. 2017年12月21日閲覧.

[10] 株式会社NTTドコモ: 歩きスマホ防止の新たな取り組みについて, https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2013/12/03_00.html. 2017年12月21日閲覧.

[11] 田辺 健, 矢野博明, 岩田洋夫: 2チャンネル振動スピーカを用いた非対称振動による非接地型並進力・回転力提示, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, No. 1, pp. 125–134 (オンライン), DOI: 10.18974/tvrsj.22.1.125 (2017).

[12] 名坂康平, 加藤岳久, 西垣正勝: スマートフォン使用時の不注意による事故防止システムの提案, *研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS)*, Vol. 2012, No. 28, pp. 1–6 (オンライン), 入手先 (<https://ci.nii.ac.jp/naid/170000069579/>) (2012).

[13] 今 悠気, 中村拓人, 梶本裕之: 腰ハンガー反射を用いた歩行ナビゲーションにおける教示の影響, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, No. 3, pp. 335–344 (オンライン), DOI: 10.18974/tvrsj.22.3.335 (2017).