

# 低照度環境下における情報探索方略の違いが網膜色素変性症によるロービジョン者の障害物またぎ動作に与える影響

## Effects of information acquisition strategies in a low-light environment on obstacles avoidance pattern among people with pigmentary retinal degeneration

宇野 直士 (徳山工業高等専門学校)

北 哲也 (大島商船高等専門学校)

Tadashi UNO (National Institute of Technology, Tokuyama College)

Tetsuya KITA (National Institute of Technology, Oshima College)

### 要旨：

目的：ロービジョン者が低照度環境下において視覚および触覚から獲得した障害物情報が障害物またぎ動作に与える影響について明らかにする。

方法：網膜色素変性症を原因疾患とするロービジョン者 10 名を被験者とした。被験者は 4cm と 15cm の障害物を 2 条件（視覚のみと視覚および触覚）で認識した後、足元に位置する提示された障害物と同形状の障害物をまたぎ動作を各条件 5 回ずつ実施した。実験空間の照度は 50-100lx に調節し、黄色のスポンジで製作した障害物を濃いベージュ色の床面に設置した。またぎ動作中の下肢動作を三次元動作解析によって分析した。

結果：視覚のみで障害物情報を知覚した場合、視覚および触覚から障害物情報を知覚した場合と比較して、障害物に対する足部軌跡を大きく確保し、足部挙上動作は不安定になった。

考察：視覚および触覚で障害物情報を探索した場合、視覚情報の欠如を触覚情報が補填し、情報の統合化が図られたことで、障害物をまたぎ際のつま先挙上高のばらつきが抑制され、より安定した障害物またぎ動作に繋がったと推察される。

キーワード：網膜色素変性症、障害物またぎ動作、低照度環境

### Abstract：

Purpose: The aim of this study was to elucidate the effect of obstacle information acquired from sight and touch, on the action of stepping over obstacles by people with pigmentary retinal degeneration, in a low-light environment. Method: Ten people with low vision (aged  $42.9 \pm 7.3$  years) caused by retinitis pigmentosa were included as subjects in this study. The subjects were made aware of obstacles measuring 4 cm and 15 cm under two conditions (visual, visual and tactile). For each condition, an obstacle of the same shape was placed at their feet and the subjects stepped

over the obstacle five times. The illumination in the experimental space was adjusted to 50-100 lx, and the obstacle made of yellow sponge was placed on a dark beige floor. The leg movement during the stepping over motion was analyzed with three-dimensional motion analysis. Results: When compared to perception by sight and touch, obstacle information perceived by sight alone resulted in a larger foot trajectory in relation to the obstacle, making the leg lifting action unstable. Discussion: In obstacle recognition using both vision and touch, the lack of visual information is supplemented with tactile information. Integrating both sets of information suppresses variation in toe elevation, which is assumed to lead to a more stable motion when stepping over obstacles.

**Key Words** : retinitis pigmentosa, obstacle avoidance patten, low-light environment

## 1. 目的

我が国は「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」が施行されて以降、公共空間のバリアフリー化が進展している。また、2016年には「障害を理由とする差別の解消に関する法律」が施行され、障害者への合理的配慮の提供に向けた環境整備が規定された。これらの取り組みにより、ロービジョン者の歩行環境は改善をみせる一方で、歩行の妨げとなる物理的バリアは依然として存在し、単独歩行には高い致命的リスクが伴う（豊田・大倉, 2017）。

物理的バリアとなる足元の障害物を回避する方略の一つにまたぎ動作がある。これまでに、ロービジョン者はその病態が重度であっても保有視覚に依存した行動をとる傾向があるため、障害物を正確に認識できず、つまずき・転倒・転落事故などに繋がる事が報告されている（安部・橋本, 2006；中西・梁島, 2006；Hassan et al., 2002；Sotimehin et al., 2018）。また、視覚情報が減少する薄暮下や夜間などの低照度環境下では、その傾向が一層高まると予測される。そのため、ロービジョン者が低照度環境下で障害物またぎ動作を安全に遂行するためには、障害物の高さや位置をより正確に認識することが求められる。

上述の課題に対して、超音波を利用した障害物探知機や触知型アイコンを用いた案内図など、IT技術やエレクトロニクス分野の小型化技術を活用した歩行・誘導システムが開発されている（Cardin et al., 2007；上田ら, 2016）。これら

の支援機器は、触覚や聴覚などの感覚器官から視覚情報の欠如を補填する情報を与える。他方で、これらの機器性能がロービジョン者の保有感覚による情報処理特性と適応しない事例も生じており、実生活で供されることは極めて少ないことが以前から指摘されている（田内・大倉, 1995）。これまでに、手足から得る触覚情報による運動誘導に対する効果が報告されており、ロービジョン者の感覚特性と生活動作との適応性に関する研究が進行している（Patla et al., 2004；Forner et al., 2016）。しかし、低照度環境や視野狭窄症状について考慮された知見はない。

本研究では、ロービジョン者が比較的日常生活で利用することが多い、足元の視覚情報と手部による触覚情報に着目し、それらの感覚情報が低照度環境下におけるロービジョン者の障害物またぎ動作に与える影響を明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1. 被験者

ロービジョンの男性10名（年齢  $42.9 \pm 7.3$  歳、身長  $167.8 \pm 3.5$ cm、体重  $66.5 \pm 7.9$ kg、下肢長  $89.2 \pm 5.4$ cm）を対象とした。10名はいずれも網膜色素変性症を原因疾患とし、視野の周辺部分が欠損する求心性視野狭窄の症状を呈していた。また、身体障害者手帳2級を保有し、視覚障害以外の障害は有しておらず、リハビリテーション施設などで歩行訓練を受けた経験がない者であった。事前に、被験者の身体障害者

表1 ロービジョン者の特性

年齢	視力 (右)	視力 (左)	白杖使用	発生時期	外出頻度
34	0.02	0.01	場所次第	25歳	多い
36	0.04	0.06	持参のみ	不明	少ない
36	0.1	0.1	白杖使用	25歳	多い
41	0.08	0.1	白杖使用	23歳	多い
41	0.2	0.2	持参のみ	30歳	多い
43	0.04	0.06	場所次第	30歳	多い
45	0.03	0.06	持参のみ	28歳	多い
46	0.02	0.04	場所次第	37歳	多い
48	0.06	0.01	場所次第	13歳	多い
59	0.05	0.09	持参のみ	12歳	多い

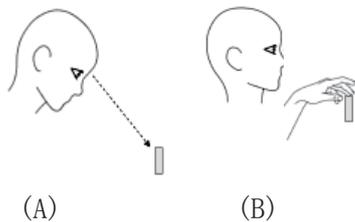


図1 障害物の提示方法  
(A) 視覚・(B) 視覚+触覚

手帳、あるいは可能な場合には医療機関から付与された視野表により現在の視覚状態を確認した。表1に被験者の年齢や単独歩行時の白杖使用の有無、障害発生時期、外出頻度などについてまとめた。視覚障害の発生時期は眼科医により眼疾患と診断を受けた当時の年齢、外出頻度は週5日以上外出しているものを多いとし、週4日以下のものを少ないと分類した。

被験者には予め実験の目的、方法、実験に伴う危険性とその配慮、匿名性の保護などについて書面または書面の読解が困難な被験者には口頭で説明を行ない、同意書を得た。本研究は徳山工業高等専門学校ヒト医学系研究倫理委員会の承認を受けて実施した。

## 2.2. 実験プロトコル

実験は車の走行音や他者の歩行音など、周囲の環境音が生じない室内にて実施した。実験室内は事前に、被験者周辺の照度が50lxから100lxの範囲で収束するように調光ライトや暗幕、デジタル照度計(シンワ社)を用いて調

節した。被験者は実験試技として、足元の障害物をまたぎ動作を行った。障害物は高さ4cm、15cmの2種類(横32cm・幅5.5cm)を用意し、被験者は視覚のみと視覚および触覚によって障害物を認識した後にまたぎ動作を行った。被験者が障害物を認識するための方法は、条件A:足元に提示された障害物を視覚により知覚(図1A)、条件B:手元に提示された障害物を視覚および手の触覚により知覚(図1B)の2条件とした。条件Aの障害物はつま先から20cm前方に位置させた。条件Bは被験者の肘の高さに障害物を提示し、探索方向や手部の形状は指定せず、左右いずれかの手部を用いた。試技は各条件5回ずつ実施した。障害物を一歩でまたぎ越すことを指示した以外は、動作開始位置や踏み出す足、視認姿勢は被験者の任意とした。なお、被験者が照度に慣れる時間を十分に確保し、試技以前に足元および手元の障害物が視認できることを確認した。いずれの条件も障害物を認識するための時間に制限は設けず、試技間の時間を十分に確保することで、前条件の影響ができる限り小さくなるように実施した。また、被験者で条件の順序が異なるように提示することで、条件順序のカウンターバランスをとった。全ての被験者が両条件下で試技を施行した。

障害物は黄色のスポンジで製作し、濃いベージュ色の床面に設置した。なお、障害物高として4cmを選定した理由は、一般的な居住住宅の和室と洋室の床段差が1cmから4cmであるためである(齋藤・村木, 2010)。また、15cmの障害物高は、「道路の移動円滑化整備ガイドライン」内で推奨されている停留所などの縁石の高さに基づき選定した。

## 2.3. 測定方法

6台の同期された高速度撮影機能付カメラ(DKH社, GC-LJ20B)を被験者に正対した状態からみて前後、左右斜め前方、左右斜め後方に配置し、撮影速度240fpsでまたぎ動作を記録した。本研究では分析空間内の進行方向をY軸、鉛直上方向をZ軸、Y軸とZ軸に直交する方向をX軸とした右手直交座標系を静止座標系として定義した。撮影範囲は1.0m(X軸)×2.5m(Y軸)×2.0m(Z軸)の空間とした。空間上にキャ

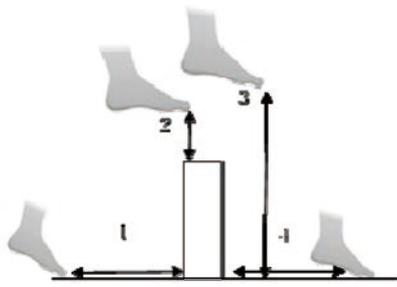


図2 またぎ動作の局面定義

リブレーションポール（高さ2m、較正点5箇所）を鉛直に立て、計90点のコントロールポイントを撮影することでキャリブレーションを行なった。撮影された映像から身体各部の分析点に貼り付けた球形反射マーカを三次元動作解析システム（DKH社、Frame-DIAS V）によって読み取った。分析点は頭頂、胸骨上縁と左右の耳下点、肩峰、肘関節、手首、大転子、膝関節中心、外果、踵、つま先とした。

解析区間は先に越える足の踵離地から対側の踵接地までとした。データを平滑化する際のデータ端点の歪みの影響を考慮し、動作の解析区間とその前後20コマをデジタイズし、得られた2次元座標からDLT法により計測点の3次元座標を求めた。障害物を先に越える下肢をLeading Limb（以下LL）、障害物を後から越える下肢をTrailing Limb（以下TL）と定義した。そして、障害物またぎ動作を①LL離地、②LL障害物上最高点（LLつま先が障害物前端を通過した時点）、③LL最高点（またぎ動作中にLLつま先を最も上げた時点）、④LL接地、⑤TL離地、⑥TL障害物上最高点（TLつま先が障害物前端を通過した時点）、⑦TL最高点（またぎ動作中にTLつま先を最も上げた時点）、⑧TL接地で局面を分けた後（図2）、動作時間の算出やデータの規格化を行なった。離地のタイミングはつま先に貼付したマーカが地面から離れた時点、接地のタイミングは踵に装着したマーカが最下点に位置した時点とした。下記に3次元座標値をもとに算出したパラメータを示す。

1. LLステップ長 (m) : LL離地時のつま先からLL接地間の踵間の距離

表2 LLのステップ長、挙上・下降時間

		条件A	条件B	p値
4cm	ステップ長 (m)	0.82 ± 4.9	0.80 ± 4.6	NS
	挙上時間 (s)	0.31 ± 0.06	0.27 ± 0.04	<0.05
	下降時間 (s)	0.25 ± 0.05	0.24 ± 0.04	NS
15cm	ステップ長 (m)	0.86 ± 0.07	0.85 ± 0.05	NS
	挙上時間 (s)	0.33 ± 0.05	0.29 ± 0.03	<0.05
	下降時間 (s)	0.28 ± 0.05	0.29 ± 0.04	NS

2. LL挙上時間 (s) : LL離地からLL最高点までに要した時間
3. LL下降時間 (s) : LL最高点からLL接地までに要した時間
4. LLおよびTL踏切距離 (cm) : LLおよびTLの踏切位置から障害物までの距離
5. 障害物上最高点 (cm) : またぎ動作中にLLおよびTLを障害物上で最も上げた際のつま先の高さ
6. 最高点 (cm) : またぎ動作中にLLおよびTLを最も上げた際のつま先の高さ
7. 5回繰り返したまたぎ動作におけるLLの障害物上最高点と最高点のばらつき  
(変動係数 [%] : 標準偏差 ÷ 平均値 × 100)
8. LLの障害物高に対する努力係数 ((最高点 - 障害物高) ÷ 障害物高)

## 2.4. 統計処理

全ての測定データは各条件の平均値±標準偏差で示した。データの比較には提示条件を要因とした対応のあるt検定を用いた。統計解析はSPSS Advanced Statistics ver.23 (IBM社)を用い、有意水準は5%未満とした。

## 3. 結果

表2にLLステップ長、LL挙上時間およびLL下降時間の結果を示す。4cm障害物高では、離地から最高点に至るまでのLL挙上時間において、条件Bが条件Aと比較して有意に低値を示した ( $p < 0.05$ )。同様の結果が15cm障害物高でも認められた ( $p < 0.05$ )。

図3および図4では踏切地点、障害物上最高点、最高点を足部軌跡として図示した。なお、図中には便宜上、接地地点を加えた。4cmおよ

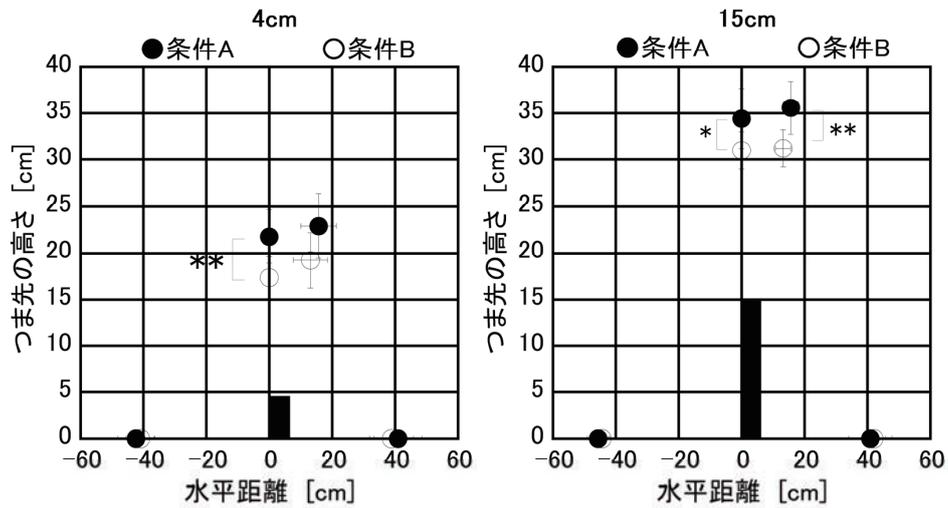


図3 提示条件間のまたぎ動作中 LL 軌跡 (踏切距離、障害物上最高点、最高点)  
 \*\*  $p < 0.01$  \*  $p < 0.05$

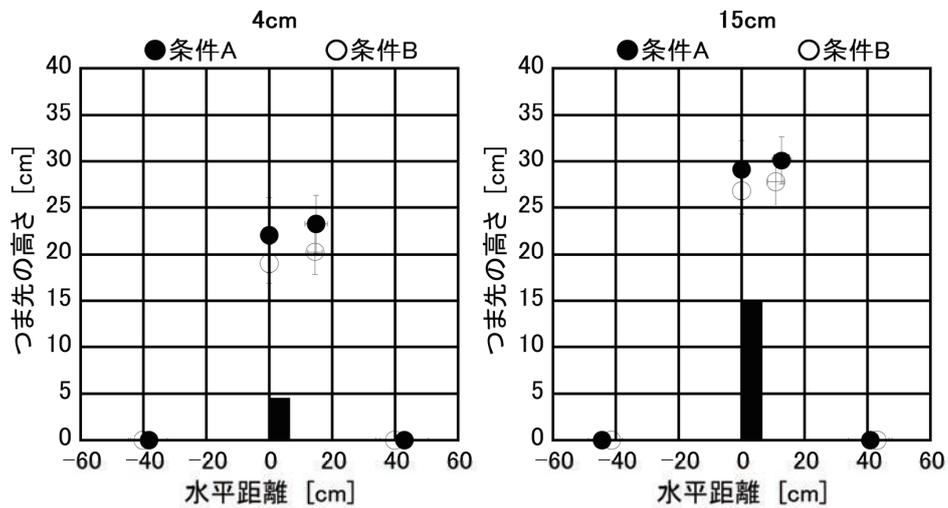


図4 提示条件間のまたぎ動作中 TL 軌跡 (踏切距離、障害物上最高点、最高点)

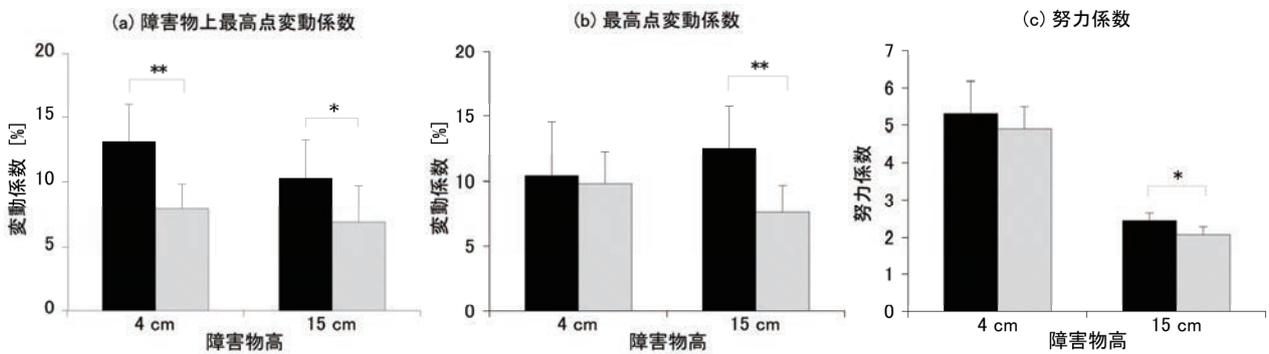


図5 提示条件間の LL のばらつきと努力係数 ((a) 障害物上最高点変動係数・(b) 最高点変動係数・(c) 努力係数、■ 条件A、□ 条件B) \*\*  $p < 0.01$  \*  $p < 0.05$

び 15cm 障害物に対する条件間の LL 軌跡の結果を図 3 に示す。4 cm 障害物に対する障害物上最高点は条件 A が有意に高値を示した ( $p < 0.01$ )。また、15cm 障害物では障害物上最高点 ( $p < 0.05$ ) および最高点 ( $p < 0.01$ ) において同様の結果が認められた。踏切距離は、いずれの障害物高も条件間に有意差は認められなかった。図 4 に 4 cm および 15cm 障害物に対する条件間の TL 軌跡の結果を示す。LL に対し TL は、いずれの障害物高に対しても踏切距離、障害物上最高点、最高点において、条件間に有意差は認められなかった。

図 5 にまたぎ動作中の LL の障害物上最高点および最高点の変動係数と努力係数の結果を示す。またぎ動作中の障害物上最高点の変動係数は、条件 B と比較して条件 A が 4 cm 障害物高 ( $p < 0.01$ )、15cm 障害物高 ( $p < 0.05$ ) いずれも有意に高値を示した。また、同様の傾向が 15cm 障害物高の最高点 ( $p < 0.01$ ) および努力係数 ( $p < 0.01$ ) で認められた。

#### 4. 考察

被験者は低照度環境下において、足元に位置する障害物高は視覚で知覚し、手元に位置する障害物高は視覚および触覚により知覚した。その直後に、提示された障害物高と同様の障害物をまたぎ越した。その結果、視覚のみで障害物情報を知覚した条件 A が、視覚および触覚から障害物情報を知覚した条件 B と比較して LL 障害物上最高点および LL 最高点とも高く位置した。これに関連して、条件 A では障害物またぎ動作中の LL 挙上動作により長い時間を要することが示された。Baig et al., (2016) および Rietbyk and Rhea. (2006) は、500lx 以上の照度環境下においても、下方周辺視野が制限されると障害物回避中の足部軌跡が増大することを報告している。また、宇野ら (2018) も網膜色素変性症患者を対象とした研究において同様の特徴を報告している。本研究の被験者はいずれも網膜色素変性症患者であり、暗所視を司る杆体視細胞の機能障害が生じていたと考えられる。そのため、条件 A では足部軌跡を高く確保し、慎重に障害物をまたぎ越すことで、障害

物情報の不確かさを補間したものと推察される。一方で、障害物の同定には視覚情報の他、聴覚や触覚といった感覚様相の情報も寄与しており、複数の感覚様相の情報が統合されることで安定した知覚表象が成立する (Newell, 2004; 和田, 2007)。また、Ernst and Bulthoff. (2004) は単一の感覚情報よりも複数の感覚情報を統合することで、より精度の高い知覚・認知が可能であることを指摘している。特に、聴覚情報は障害物の位置同定に有益な情報を与えることが Ashmead et al., (1989) らにより報告されているが、障害物回避に関わる触覚情報の有効性については、白杖から得る間接的な触覚情報を除いて十分に検証されていない。本研究では、またぎ動作の開始位置を 1 歩で越える位置とすることや、障害物を反響音が生じないスポンジで製作することで、障害物の同定に寄与する聴覚情報を制限して実験をおこなった。その結果、視覚情報と合わせて手部の触覚により障害物情報を探索した条件 B では、条件 A と比較して LL 足部軌跡が小さくなった。このことは、ロービジョン者が視覚と手部の触覚を介して得た障害物情報から、障害物の形状に関するより詳細なイメージを認知し、障害物またぎ動作に適用した可能性を示唆している。

また、障害物をまたぐ際の LL 障害物上最高点・最高点の変動係数および LL 努力係数はいずれも条件 B が低値を示した。ヒトの姿勢制御に関わる感覚入力は、主に視覚、前庭感覚および体性感覚が担っている (Diener and Dichgans, 1988)。そして、これらの感覚入力の中樞神経系において統合され、姿勢制御に利用される (板谷, 2015)。Kluzik et al., (2005) が指摘する通り、感覚入力に対する重みづけには個人差があるが、一般的に眼疾患や加齢の影響を受けて視覚による感覚入力低下した場合、身体動揺が増幅し、姿勢制御が不安定になる (Peterka, 2002; Hwang et al., 2014)。前述の通り、被験者は重度の視野障害を呈するため、保有視覚に限った条件 A では足部挙上に伴う姿勢制御が困難になり、つま先挙上高にばらつきが認められた。そして、不安定な足部挙上動作に伴う転倒リスクを回避するために、運動の効率性では

なく安全性の確保を最も重視して障害物またぎ動作が実行された。一方で、条件Bでは視覚情報の欠如を触覚情報が補填し、情報の統合化が図られたことで、障害物をまたぐ際のつま先挙上高のばらつきが抑制され、より安定した障害物またぎ動作に繋がったと推察される。

視覚や触覚から得た情報をフィードバックし、下肢運動が制御されたLLに対し、TL足部軌跡はいずれの障害物高も条件間の差は認められなかった。一般的に、障害物またぎ動作中のTL足部軌跡は視覚的フィードフォワード制御により調整される (Patla and Vickers, 1997)。つまり、LLを前方へ送り出す動作では視覚情報を最大限利用できるのに対し、TLを前方へ引き込む動作では、身体により障害物が遮蔽されるためフィードフォワード制御により運動形成される。著者らは、情報探索方略や低照度環境下の影響により、LL同様、TL足部軌跡にも条件間に差が生じることを推測していた。しかしながら、本研究では探索条件間に明確な差は認められなかったため、ロービジョン者のTL足部軌跡は、健常者と同様に視覚による運動制御の影響を強く受けることが示唆された。

本研究は、網膜色素変性症によるロービジョン者を対象としたが、眼疾患の種類や歩行訓練経験の有無により、視覚情報や触覚情報に対する情報処理特性や行動特性は異なる。こうした点を考慮し、眼疾患別の影響についても検討を進める必要がある。また、ヒトが物体を触知する場合、視覚経験から形成された視覚イメージが有効な手がかりとして働くことで効率的な物体認識に繋がる (Deibert et al., 1999; Sathian et al., 1997)。表1の通り、被験者はいずれも過去に視覚経験を有する。また、日常的な外出頻度も高く、移動に触覚情報を活用する機会も多いことが推測される。これらの特性は、手部から比較的詳細な障害物情報を得ることに寄与したと推察される。今後は、中途視覚障害者の中でも幼少期など比較的早期に視覚障害に罹患したケースも含めて検討を進める必要がある。

## 5. まとめ

本研究は、網膜色素変性症を原因疾患とするロービジョン者が、低照度環境下において視覚のみおよび視覚と触覚の併用により獲得した障害物情報が障害物またぎ動作に与える影響について検討した。その結果、視覚のみで障害物情報を知覚した場合、障害物に対するつま先軌跡が大きくなり、つま先挙上高が不安定になった。一方で、視覚および触覚を併用して障害物情報を探索した場合、障害物をまたぐ際のつま先挙上高のばらつきが抑制され、より安定した障害物またぎ動作となった。本研究から、重度のロービジョン者にとって見えづらさが増す低照度環境下では、視覚情報と触覚情報を統合して障害物を知覚・認知することで、より安全に障害物を回避できる可能性が示唆された。今後、従来から推奨されている白杖による歩行移動の普及と合わせて、本研究知見を基礎としたロービジョン者の情報処理特性と生活動作の関係性に適応する歩行支援機器の開発・評価に取り組みたいと考える。

## 謝辞

本研究に被験者としてご協力いただいた方々に感謝の意を申し上げます。本研究はJSPS科研費(19K20001)の助成を受けたものです。

## 文献

- 安部信行・橋本典久 (2006) 視覚障害者の歩行事故に関する基礎調査. 日本建築学会技術報告集, 23, 325-329.
- Ashmead, D.H., Hill, E.W., & Talor, C. R. (1989) Obstacle perception by congenitally blind children. *Perception & Psychophysics*, 46(5), 425-433.
- Baig, S., Diniz-Filho, A., Wu, Z., Abe, R.Y., Gracitelli, C.P.B., Cabezas, E., & Medeiros, F.A. (2016) Association of fast visual field loss with risk of falling in patients with glaucoma. *JAMA Ophthalmology*, 134(8), 880-886.
- Cardin, S., Thalmann, D., & Vexo, F. (2007) A wearable system for mobility improvement of visually impaired people. *The Visual Computer*,

- 23(2), 109-118.
- Deibert, E., Kraut, M., Kremen, S., & Hart, J. Jr. (1999) Neural pathways in tactile object recognition. *Neurology*, 52(7), 1413-1417.
- Diener, H.C., & Dichgans, J. (1988) On the role of vestibular, visual and somatosensory information for dynamic postural control in humans. *Progress in Brain Research*, 76, 253-262.
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H.H. (2004) Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162-169.
- Forner-Cordero, A., Garcia, V.D., Rodrigues, S.T., & Duysens, J. (2016) Obstacle Crossing Differences Between Blind and Blindfolded Subjects After Haptic Exploration. *Journal of Motor Behavior*, 48(5), 468-478.
- Hassan, S.E., Lovie-Kitchin, J.E., & Woods, R.L. (2002) Vision and mobility performance of subjects with age-related macular degeneration. *Optometry and Vision Science*, 79(11), 697-707.
- Hwang, S., Agada, P., Kiemel, T., & Jeka, J.J. (2014) Dynamic reweighting of three modalities for sensor fusion. *PLoS ONE*, 9(1), 1-8.
- Kluzik, J.A., Horak, F.B., & Peterka, R.J. (2005) Differences in preferred reference frames for postural orientation shown by after-effects of stance on an inclined surface. *Experimental Brain Research*, 162(4), 474-489.
- 板谷厚 (2015) 感覚と姿勢制御のフィードバックシステム. *バイオメカニズム学会誌*, 39(4), 197-203.
- 中西勉・梁島謙次 (2006) ロービジョン者に対する屋外歩行に関するアンケート結果: 網膜色素変性症患者の視野の状態による比較. *日本眼科紀要*, 57, 541-547.
- Newell, F.N. (2004) Cross-modal object recognition. In G.Galvert, C.Spence, & B.E.Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes*, Oxford: Oxford University Press.
- Patla, A.E., & Vickers, J.N. (1997) Where and when do we look as we approach and step over an obstacle in the travel path? *NeuroReport*, 8(17), 3661-3665.
- Patla, A.E., Davies, T.C., & Niechwiej, E. (2004) Obstacle avoidance during locomotion using haptic information in normally sighted humans. *Experimental Brain Research*, 155, 173-185.
- Peterka, R. (2002) Sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol*, 88, 1097-1118.
- Rietdyk, S., & Rhea, C.K. (2006) Control of adaptive locomotion: Effect of visual obstruction and visual cues in the environment. *Experimental Brain Research*, 169(2), 272-278.
- 齋藤誠二・村木里志 (2010) 高齢者の障害物またぎ動作における足の軌跡と位置知覚に関する研究. *人間工学*, 46(2), 172-179.
- Sathian, K., Zangaladze, A., Hoffman, J.M., & Grafton, S.T. (1997) Feeling with the mind's eye. *NeuroReport*, 8, 3877-3881.
- 田内雅規・大倉元宏 (1995) 視覚障害者支援技術の現状と問題点: 単独歩行について. *計測と制御*, 34(2), 140-146.
- Sotimehin, A.E., Yonge, A.V., Mihailovic, A., West, S.K., Friedman, D.S., Gitlin, L.N., & Ramulu, P.Y. (2018) Locations, Circumstances, and Outcomes of Falls in Patients with Glaucoma. *American Journal of Ophthalmology*, 192, 131-141.
- 豊田航・大倉元宏 (2017) 視覚障害者の歩行支援に関する福祉用具・システム開発とアウトリーチ活動. *成蹊大学理工学部研究報告*, 54(1), 23-28.
- 上田篤嗣・澤田陽一・村上貴英・齋藤真・筒井澄栄 (2016) 中途視覚障害者の移動支援に役立つ触知ピクトグラムの最適サイズの予備的検討. *デザイン学研究*, 63(3), 29-36.
- 宇野直士・LOH Ping Yeap・村木里志 (2018) 網膜色素変性症患者の障害物またぎ動作における下肢運動の特徴. *人間工学*, 54(5), 197-204.
- 和田裕一 (2007) 触覚方位弁別課題に及ぼす視覚情報の影響. *心理学研究*, 78(3), 297-302.