東海大学紀要情報理工学部
Vol.18, 2018, pp.9-14

人間―ロボット間の安全性向上のための ロボットの行動提示デバイスの開発

村松聡*1 山本耕介*1 中後大輔*2 横田祥*3 橋本洋志*4

Development of the robot action announcement device for realizing safe mobile robot

by

Satoshi Muramatsu, Kousuke Yamamoto, Daisuke Chugo, Syo Yokota and Hiroshi Hashimoto

(Received on Dec. 3, 2018 & Accepted Jan. 31, 2019)

Abstract

In this paper, we describe a robot action announcement device that communicates the action plan of the robot to the surroundings in real time which we developed. The developed announcement device presents the traveling direction of the robot at the time after an arbitrary number of seconds to the surrounding pedestrians. By this device, even when a robot and a pedestrian must take evasive action with a narrow road or the like, the traveling direction of the robot can be known, so that the pedestrian and robot can safely move in such environments. Experimental verification of the device was conducted for 20 subjects and we were able to demonstrate its effectiveness. It was also found that appropriate announcement can be presented by presenting the action 2 seconds before the robot starts action.

Keywords: Automobile safety Human robot interaction

1　はじめに

現在，移動案内ロボットの研究が様々な形で試みられている．[1]~[6]そして今後見込まれる市場規模の増加から活躍の場が今後益々広がっていくと見られる．[7]その運用の際には人間共存環境で動作するため人体に危害を加えることなく安全に運用出来ることが求められる．

しかしながら，ロボットの安全な運用に関する規定や法律は現状存在していない[8]．特に歩行者や自転車が行きかう公共空間においてロボットの存在及び行動を周知させ，安全に運用する手法は様々な研究がなされているが確立されてはいない[9][10]．例えば，車道を走る自動車はウインカーやブレーキランプによってこれからの行動を周囲に提示することで安全性を高めている．

しかし，自動車とロボットでは動作環境や構造が異なる為，自動車の機構をロボットにそのまま搭載するだけでは周囲に適切に行動を提示出来ないと考えられる．

本論文では移動案内ロボットでの使用を前提とする新たな行動提示装置を提案する．

2　安全性確保の方針

歩道などの人間共存環境でのロボットの動作においては通行者の妨げにならずロボット自身の視認性も確保しなければならない．通行者がロボットの存在に気が付かない事があっては，ロボット自身で回避動作を行わせたとしても不意の事故が発生してしまうことが考えられるからである．

よって，遠くからでも確認できる様な機体でなくてはならず公共空間内での親和性にも優れているロボットであることが望ましい．また，広場などの道幅が広い空間であればロボットによる回避行動のみでも安全性を確保することが比較的容易であると考えられるが，狭い道路においては走行計画を歩行者に伝わりやすい形で周囲へ伝達しなければ，ロボットが回避動作を行っても歩行者が意図に気が付かずに衝突してしまう恐れがある．

筆者らは，パトランプ及び案内音声による案内手法において赤色のパトランプと案内音声を一秒前に流す機能を併用することで適切な伝達が出来ることを確認している[11]．

しかし，これは屋外では音声や光が伝わりにくいことに加え，日本語のみの音声案内では外国人歩行 者に意図が正しく伝わらないことが考えられる．よって，移動ロボットにおいては既存の手法にはない新しい形状の行動提示装置が必要である．本研究では，次節に述べる行動提示装置の試作と検証を行い，その有効性を評価した．

3　行動提示装置

本研究で開発した行動提示装置は，Fig. 1 に示すように矢印型の装置をロボットの頂点に設置し，ロボットの進行方向に応じてその向きを変えることで，周囲の歩行者などに対してロボットの進行方向を提示するし，人間と共存する環境下での人とロ

＊１　東海大学　情報理工学部コンピュータ応用工学科
＊２　関西学院大学
＊３　東洋大学
＊４　産業技術大学院大学

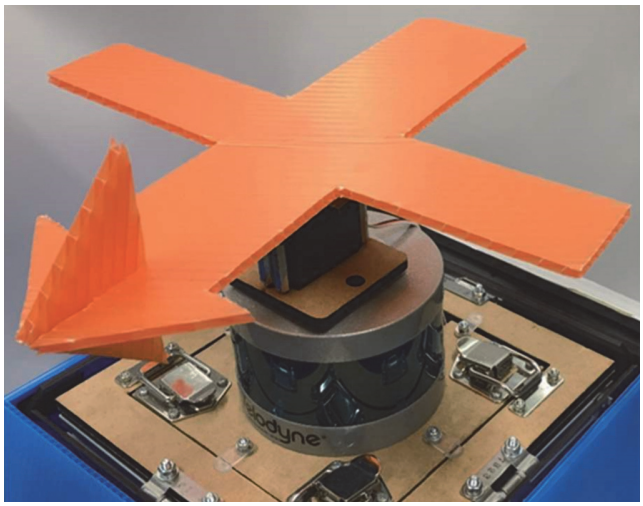


Fig. 1　Announcement Device

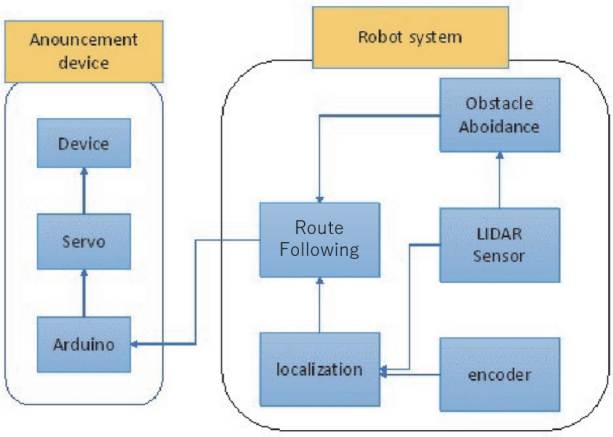


Fig. 2　System overview

ボット間の安全性向上を図るものである．
本装置の機械的構造は，サーボモータに矢印型の構造物が取り付けられている単純な構造で成り立っておりその大きさは縦横のサイズをそれぞれ 280mm×260mm とした．
これは日本国内で一般的に使用されている歩行者用信号機の大きさに準拠するものである．
本装置はロボットの自律移動に際し，周辺環境の計測に用いられる三次元 LIDAR(Velodyne 製 VLP16)の上部に取り付けられており，その計測視野角を大きく阻害することはない．
設置位置については地上高 1.1m とした．対象とする歩行者の最小身長を小学一年生の平均身長 116cm と見積もり[12]，その視野角内に提示装置が視認しやすい位置を採用することで，老若男女を問わず本装置の視認性向上を図った． また，非言語による行動提示なので非日本語話者を含めたすべての歩行者に意図が伝達できると考えられる．
ウインカーとは違い，矢印の回転により行動を提示するので，障害物を回避するのか，曲がり角を曲がるのかといった詳細な行動の提示にも対応できると考えられる．
さらに本装置を構成する矢印部は容易に取り外し可能であり，ロボットが行動する環境や時間，天候等に合わせて，異なる色のものに変更することも可能である．
なお,本論文では事前の感性評価実験により最も視認しやすく，カラースケールより威圧感を与えない色である暖色系のオレンジ色のものを採用した．

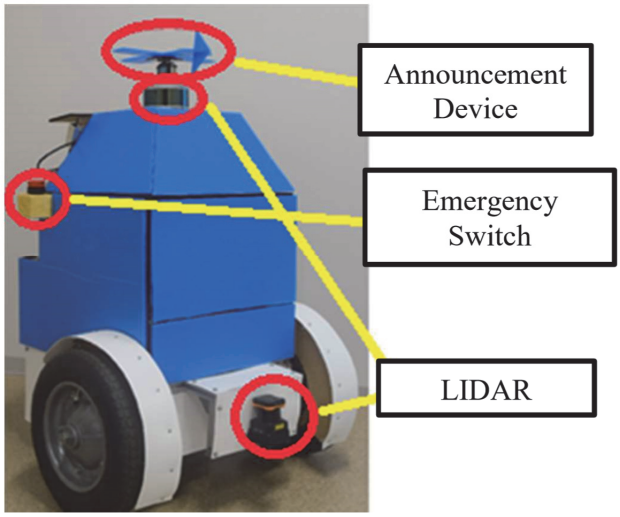


Fig. 3　Robot Overview

次に本装置のシステム構成について述べる．本システムは Fig.2 に示すように小型コンピュータである arduino に接続されたサーボモータをロボット用 OS のひとつである ROS によって制御しており，ROS で構成された移動ロボットのシステムに容易に組み込むことが可能である．
本論文で用いた移動ロボットのシステムは各種センサの計測，自己位置推定，障害物回避，経路追従の大まかに 5 つの ROS ノードで構成されている．
本システムは，移動ロボットの自動走行に広く用いられているウェイポイント形式を経路追従の方式として採用しており，エンコーダや LIDAR による計測データからロボットの自己位置を推定し，その情報と障害物回避の情報を元に次の移動経路を決定する．
このとき，システムはロボットの経路追従における旋回行動を何秒前に提示するかに従って，数手先の経路情報からそのポイントに向かうための操舵角を算出する．その後，現在のロボットの操舵角と任意の秒数後の操舵角の差分角度を提示角度として，その角度と同じ角度だけサーボモータを駆動させるという単純な原理に基づいて，その提示方向が制御される．

4　移動ロボット

本論文で用いた移動ロボットについて述べる． 本ロボットは，大学のキャンパス内を自動案内することを前提とした自立移動ロボットとして作成されており，その外見は Fig.3 に示すとおりである．
本ロボットは独立 2 輪操舵方式を採用しており，大きさは W×H×D=0.6×1.1×0.5m，重量 40Kg，最大時速 6Km で走行可能である．ただし，我が国のロボット特区における自律移動ロボットの制限速度である時速 4Km を上限として制御している．
外界センサとしてロボット上部に 3 次元 LIDAR（VLP16）が取り付けられており，3 次元 LIDAR の死角である低床部を補うために 2 次元 LIDAR(T(UTM-30LX)がロボット下部に設置されている．内界センサとしては，エンコーダおよび MEMS 式のジャイロセンサを搭載している． また，緊急時にロボットを停止さ

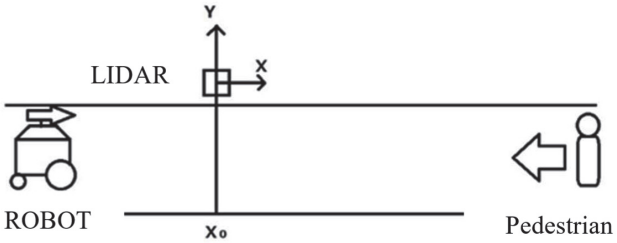


Fig. 4　Experimental environment (setup)

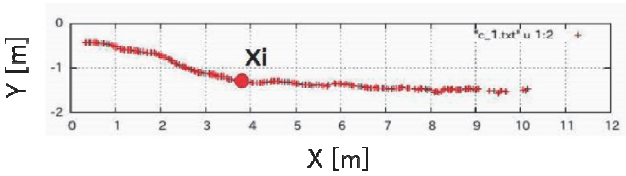
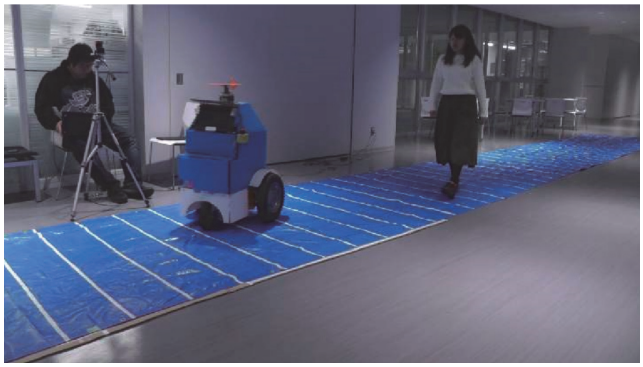


Fig. 5 Example of subject's Trajectory

A　Started walking



B　Started avoidance

C Started passing each other

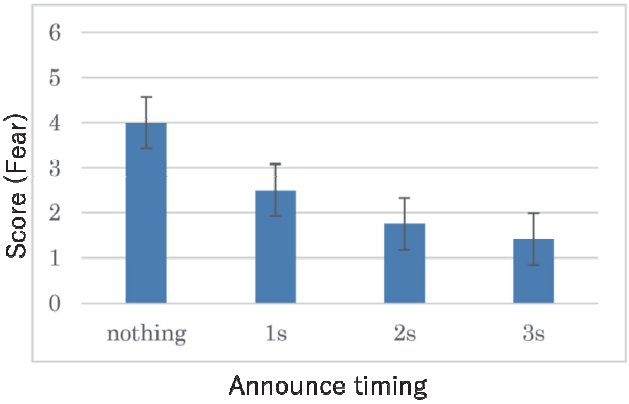
D　Finished passing each other

Fig. 6 Illustration of experiment

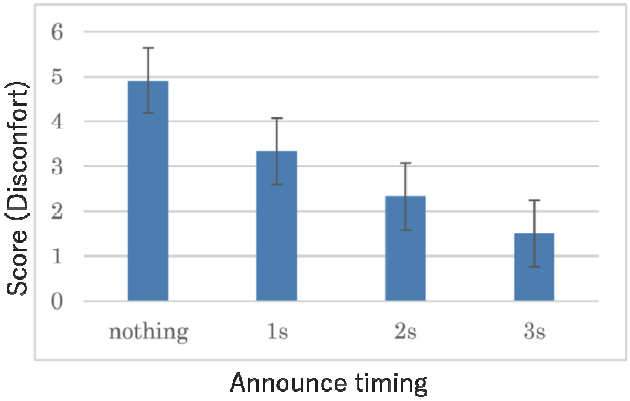
せるための停止スイッチが上部に取り付けられている．
行動提示装置は前節で述べたようにロボット頂点に取り付けられている．
本論文および屋外公道での公開実験であるつくばチャレンジでは，筆者らの所属するスクールカラーに基づいて，ロボット本体のカラーは明度の高い青と白を採用した．
ロボット上部の青色に関しては日中のみの使用を想定しているため，夜間に視認性が落ちてしまうという寒色系の色の特徴はあまり影響を及ぼさずに済む[13].
ロボットの下部の白色は日中の視認性の良さや案内対象者や周囲に与える心理的影響，および他のロボットの LIDAR から検出されやすいことを考慮した．
本ロボットの外装も提示装置同様に用意に取り外すことが可能であり，想定する環境や時間，天候などによって，別の色の外装部品に交換することが可能である．

5　評価実験

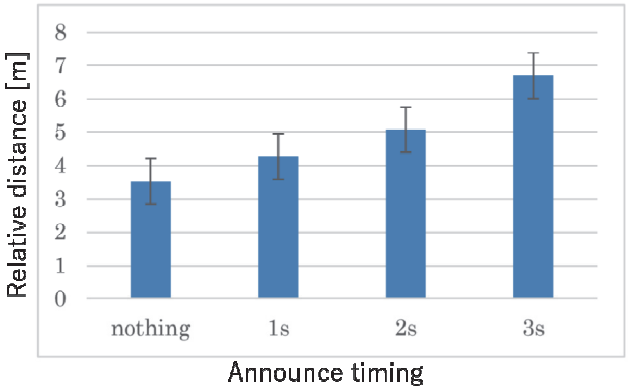
行動提示装置の有効性を検証するためにロボットと歩行者がすれ違う時の歩行者の歩行の軌跡評価 および歩行者が感じた恐怖，不快感やタイミングに関する感性評価を行った．
Fig.4 に示すような長さ 15m，幅 1.7m の通路をロボットと歩行者が向かい合う様に通行する．この道路をすれ違うにはロボットと歩行者が共に回避 動作を行わなければならない．
本実験は被験者とロボットが 15m 離れた位置からお互いに前進を行い，ロボットは事前に定められたロボットの回避行動開始位置 X_0 において左右どちらかに旋回して再び直進するように行動する．この時，被験者にはロボットの回避行動開始位置 X_0 および旋回方向は知らせていない．
提示装置の有効性は，回避動作を行う前に装置による案内を行う場合と行わない場合での歩行者の恐怖度と不快感について 6 段階のシェッフェの一対比較法で評価した．
また，提示を行う際のタイミングの適切さについてもアンケートによって何秒前に提示を行うのが適切と感じたか感性評価を行った．
被験者は 10 代から 30 代までの日本国籍および外国籍の男性 10 人，女子 10 人であり，得られた評価結果については有意水準 5% の t 検定を行っている．以後示す感性評価の結果については，t 検定における p 値が 0.05 を下回ることを確認しており，本結果



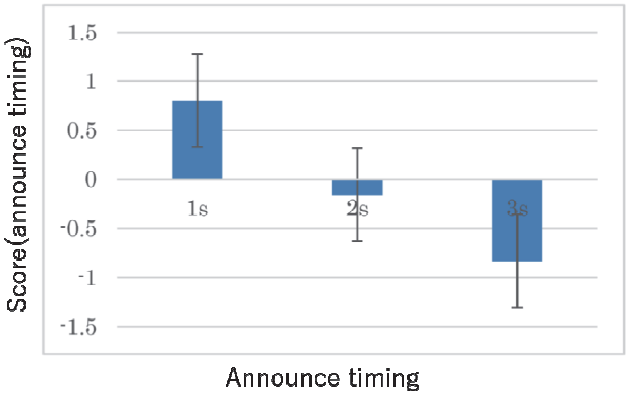
A　Result of fear score



B　Result of Discomfort score



C　Result of relative distance



D Result of announcement timing score

Fig.7 Result of kansei evaluation

が偶然によるものではないことを検証済みである．

また，本実験においては，歩行者毎に歩く速さが異なるため，感じる恐怖度などにばらつきが出ないようにする必要がある．そこで本実験では，事前に一度歩行者に実験コースを歩いてもらいその歩行速度を事前に計測し，被験者の歩行速度に 応じて，すべての被験者で歩行開始から同じ経過時間後にロボットが回避行動をとるようにロボットの回避行動位置X_0を変更し，キャリブレーションを行った．

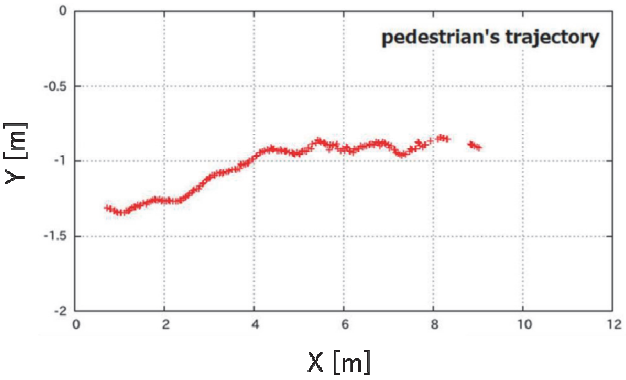
同時に設置した LIDAR によって歩行者の移動軌跡を計測し，ロボットの回避行動開始位置X_0から歩行者の回避行動開始位置Xi までの距離を計測する．歩行者の移動軌跡の計測例を Fig. 5 に示す．

また，本実験の様子を Fig. 6 に示す．Fig. 6A は被験者が歩行を開始した様子を示しており，Fig. 6B は回避行動開始時の様子を，Fig. 6C はすれ違い開始時の様子であり，Fig. 6D はすれ違い完了時の様子を示している．

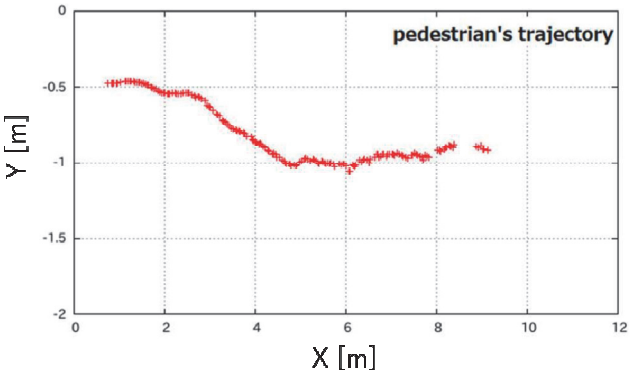
以上の実験を行動を提示するタイミングを変更して行った．評価実験の結果を Fig. 7 に示す．Fig. 7A と Fig. 7B はそれぞれ被験者の恐怖度と不快感の平均である．この図において，横軸は提示を行わない場合と 1 秒前，2 秒前，3 秒前に提示を行った場合の条件を表しており，縦軸は被験者の評価値を表している．この値が高いほど被験者には恐怖と不快感が生じていることになる． Fig. 7C はロボットの回避行動開始位置X_0と歩行者の回避行動開始位置Xi の相対距離[m]を表している．横軸は Fig. 7A, Fig. 7B と同様に実験の条件を表しており，縦軸は相対距離[m]を表している．Fig. 7D は行動を提示したタイミングが適切であったかどうかの評価結果である．この図において横軸はそれぞれ提示タイミングを表しており，縦軸はその提示タイミングにおいて被験者が適切と感じたかどうかの評価値を表している．本図の縦軸においては 0 に近ければそのタイミングが適切であることを表し，値がプラス方向にふれるほどタイミングが遅い，値がマイナスにふれるほどタイミングが早いということを表している．

実験結果より行動提示を行う場合と行わない場合での恐怖と不快感に有意差が表れており，本提示装置によって行動を提示し，その提示タイミングが早くなるにしたがって，これらの値が緩和されていることが分かる． また Fig. 8 の実験条件による被験者の移動軌跡の変化に示すように行動提示のタイミングが早くなるにしたがって，歩行者の回避行動開始位置が伸びていることが分かる．Fig. 8 においては横軸 x=0 の位置がロボットの回避行動開始位置である．なお，Fig. 8 は 20 名の被験者のうち 1 名の歩行軌跡の例である．

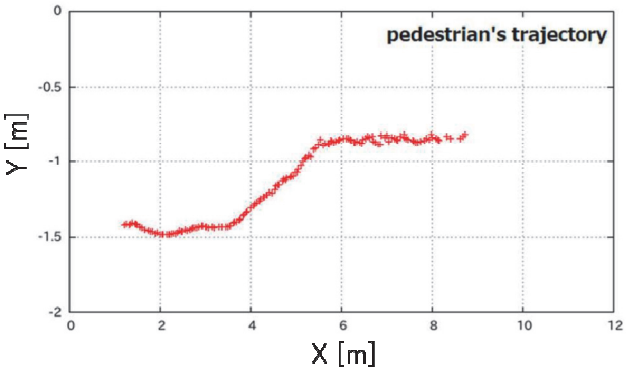
Fig. 8A は案内提示を行わない場合の被験者お歩行軌跡であり，被験者はロボットに対して 4.2m 前で回避行動をとっていることが分かる．Fig. 8B は 1 秒前に提示を行った場合であり，被験者は 4.8m 前で回避行動をとっていることが分かる．Fig. 8C は 2 秒前に提示を行った場合であり，被験者は 5.4m 前で回避行動をとっていることが分かる．Fig. 8D は 3 秒前に提示を行った場合であり，被験者は 6.9m 前で回避行動をとっていることが分かる．



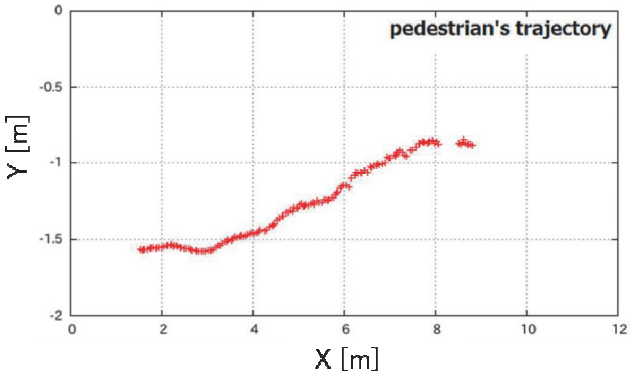
A Subject’s trajectory (Without announcement)



B Subject’s trajectory (announce 1s before)



C Subject’s trajectory (announce 2s before)



D Subject’s trajectory (announce 3s before)

Fig. 8 Subject’s trajectory

回避行動をとった際の相対位置が伸びていることからより，接触の危険性が低下しているとみることができる．

回避行動をとった距離を考えると，提示タイミングは早ければ早いほど良いということが推察される．しかしながら，本研究においては，ロボットは先に述べたようにロボット特区における制限速度である時速 4Km で走行しており，歩行者は一般的な歩行速度である時速 5Km から 6Km で歩行している．このことから両者の相対速度は時速 9Km から 10Km となる．

提示タイミングを 2 秒前に行った場合，両者が衝突するまでの相対距離は，おおよそ 5m となる．Fig. 7C および Fig. 8C を見ると，被験者はこの衝突距離よりもわずかに長い 5.2m 前後で回避行動をとっており，相対距離の観点から早すぎず，遅すぎないちょうどよいタイミングで提示できていると考えることができる．このことは Fig. 7D に示すように 2 秒前に提示した場合が最もちょうどよいという感性評価を得られていることからも明らかである．一方で 3 秒前に提示した場合は，両者が衝突するまでの相対距離はおおよそ 8m となる．Fig. 7C および Fig. 8D を見ると，被験者は 6.6m と衝突する相対距離よりも短い距離で回避行動を開始している．しかしながら，回避するために十分な距離を確保できており，余裕をもった行動がとれていると考えられる．このことは Fig. 7D に示すように提示タイミングが早いという結果につながっており，余裕を持った行動という観点からは適切であるが，ユーザーとロボットの調和的な行動の観点からは適切なタイミングではなかったと評価することができる．以上より，本研究では，2 秒前にロボットの動作を提示することが適切であると評価する．

音と光を用いた先行研究[11]では 1 秒前が最も適切であるとされていたが，装置の動きの後に自ら考えて回避動作を行う必要があったことと，一般的に聴覚に対する反応の方が視覚よりも早く反応可能であると考えられる為[14]に早いタイミングでの提示が適切と評価されたと思われる．

このような人間の認知機能を考慮した比較検証については，今後さらなる検証を行っていきたい．

以上より，本論文で提案した行動提示装置の有効性が検証できた．

6　おわりに

本論文では，人間と共存する環境で歩行者とロボット間の安全性向上を図るために，事前の行動提示が有効であると考え，ロボットの進行方向を提示するための提示デバイスの試作と評価を行った． また，提示装置の試作やロボットの外装においてはサイズや設置位置，色についてカラースケールなど感性工学的な手法を取り入れることで歩行者の視認性を考慮した．また容易に外装や装置を交換可能とすることで，運用する環境や状況に適合できることを目指した．

システムにおいても ROS のノードとして開発することで，ROS で構築されているロボットシステムに組み込いやすいことを考慮した．

歩行者に対する評価実験により，本提案手法によって周囲への提示を 2 秒前に行うことで適切なタイミングで情報が提示でき，歩行者の恐怖度と不快感が軽減できることがわかった．

また，これによってすれ違い時のロボットと歩行者間の相対距離を十分にとれることから接触の危険性が下がると考えられる．

以上より本論文で提案した行動提示装置は非常に単純な構造ながら，ロボットの安全性向上に有効であると考えられる．
今回は提案した行動提示装置の有効性を検証するものであったため本装置単独での評価を行ったが，今後は既存のアラーム音やピクトサインのような図形などを組み合わせることでさらなる安全性向上が図れないかを検証していく予定である．さらに人間の認知機能を考慮した検証も行っていきたい．
本装置はロボットの走行時の行動提示を前提しているものであるため，現状ではロボットの進行方向を提示することができればよいが，実際の環境での運用においては「停止動作」の提示も重要であると考えるため，これについても提示装置の変形機構などを検討し，その実現を図っていきたい．

参考文献

[I] Y．Takahashi， S．Ogawa and S．Machida，"Front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheel chair robot，" Proc． of the 25th IEEE Industrial Electronics Society (IECON)， pp. 668-673，1999 ．

[2] R．Carelli， C．Soria，O．Nasisi and E．Freire，”Stable AGV Conidor Navigation with Fused Vision Based Control Signals，", Proc． of the 28th IEEE Industrial Electronics Society (IECON)， pp. 2433-2438，2002.

[3] T．Fukuda，S．Ito，N．Oota，F．Arai，Y．Abe，K．Tanaka and Y．Tanaka，"Navigation System based on Ceiling Landmark Recognition for Autonomous Mobile Robot, " Proc. of the 19th IEEE Industrial Electronics Society (IECON)，pp．l 466-1471，1993.

[4] X. Gao, K. Lie, Y. Wang, G. Men, D. Zhou and K． Kikuchi, "A Floor Cleaning Robot Using Swedish Wheels, " Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBTO)，pp．2069-2073，2007

[5] Y．Shimosawa，T．Kanemoto，K．Hakamada，H．Horii，T．Ariki，Y. Sugawara， F．Kojio，A．Kimura and S．Yuta，"Some Results of the Test Operation of Security Service System with Autonomous Guard Robot，"Proc．of the 26th IEEE Industrial Electronics Society (IECON)，pp．24332438，2000.

[6] D．Chugo， T．Higuchi， Y．Sakaida， S．Yokota and H．Hashimoto，”An Assistive Wheelchair based on a Concept of a Passive Robotics，" Proc．of the 39th IEEE Industrial Electronics Society (lECON)，pp．8253-8258，2013.

[7]平成 27 年度版 情報通信白書 総務省(2015)

[8]加部 隆史，木村 哲也，高森 年，杉本 旭「サービ スロボットの安全性」日本機械学会論 文集（C 編 ）75 巻 754 号 pp. 278-286

[9]Mitsumasa Yoda and YasuhitoShiota,” A Study on the Mobile Robot which Passes a Man”，日本ロボット学会誌 vol．17 No．2 P202~209 1999

[10] Yuji HOSODA， Kenjirou YAMAMOTO， Ryouko ICHINOSE, Saku EGAWA，Junichi TAMAMOTO and Takashi TSUBOUCHI “Collision Avoidance Control of Human-Symbiotic Robot” 日本機械学会論文集(C 編)77 巻 775 号(2011-3)

[11] Satoshi Muramatsu, Saki Higashi, Daisuke Chugo Sho Yokota, Hiroshi Hashimoto”Consideration of the preliminary announcement function for the human friendly service robot”Industrial Electronics Society ， IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE

[12]平成 27 年度版 学校保健統計調査報告書 文部科 学省

[13] 城一夫 徹底図解色の仕組み 新星出版(2009)

[14]竹内薫 図解入門よくわかる最新時間論の基本と 仕組み: 時間・空間・次元の物理学 秀和システム