T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	在宅酸素療法患者の外出支援のためのカート型移動体ロボット
Title(English)	Mobile cart robot development to support HOT patients' going out
著者(和文)	入部正継, 前田直人, 遠藤玄, 田窪敏夫, 大平峰子
Authors(English)	Masatsugu Iribe, Naoto Maeta, Gen Endo, Toshio Takubo, Mineko Ohira
出典(和文)	第20回ロボティクス・シンポジア, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2015, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

在宅酸素療法患者の外出支援のためのカート型移動体ロボット

入部 正継[*1]，前田 直人[*1]，遠藤 玄[*2]，田窪 敏夫[*3]，大平 峰子[*4]

Mobile cart robot development to support HOT patients' going out

Masatsugu IRIBE[*1], Naoto MAETA[*1], Gen ENDO[*2],
Toshio TAKUBO[*3], Mineko OHIRA[*4]

[*1] Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University
18-8 Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka 572-8530, Japan
[*2]Institute of Biomaterials and Bioengineering, Tokyo Medical and Dental University
2-3-10 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0062, Japan
[*3] School of Medicine, Tokyo Women's Medical University
8-1 Kawada-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan
[*4]East Nagano Hospital
2-477 Ueno, Nagano-shi, Nagano 381-8567, Japan

In this paper we propose a kind of motion control interface system of the mobile robot to support Home Oxygen Therapy (HOT) patients' going out. Our developed mobile robot is a guidance type which moves ahead of the user according to their pushing force. The robot's operational interface apparatus adopts simple mechanism and popular force sensors to sense the pushing force signals from users. And we also adopt 2-D.O.F. controller to control the robot's moving velocity for adjusting the operational response between the user and robot. Then we verified the effectiveness of the control system by some user experiments with a prototype robot and HOT patients, and received a good evaluation for its performance.

Key Words : Home Oxygen Therapy, Mobile robot, Impedance adjustment, 2 D.O.F. control system

1. 緒言

在宅酸素療法（Home Oxygen Therapy, HOT）とは肺機能の低下した患者に対して高濃度の酸素を鼻や口から供給することで血中酸素濃度を保つ対症療法であり，現在日本では約 16 万人が加療中である．この HOT 加療中の患者が外出する際には，図 1 に示すように携帯用酸素ボンベとそれを運ぶ搬送カートを携帯する必要があるが，これらの機器を合計すると 5kg 弱の質量となる．そのために患者にとっての肉体的・心理的負担となり，外出が億劫で家に引きこもりがちになる原因となっている．ある HOT 患者に対するアンケート調査[(1)]によると，HOT 患者が外出しない理由が携帯用酸素の問題であるとの回答は 55%（有効回答数 88 名）に上り，さらに詳しく調べると，携帯用酸素の重量が問題であるとの回答が 68%（有効回答数 53 名）と，最も大きな理由であることが確認できる．

[*1] 大阪電気通信大学工学部電子機械工学科（〒572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8）iribe@isc.osakac.ac.jp

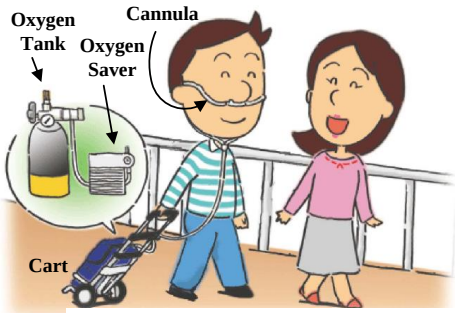
[*2] 東京医科歯科大学生体材料工学研究所バイオメカニクス分野（〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-10）gendo.bmc@tmd.ac.jp

[*3] 東京女子医科大学医学部（〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-10）takubo.toshio@twmu.ac.jp

[*4] 東長野病院（〒381-0085 長野県長野市上野 2 丁目 477）

そのような背景の中，我々は HOT 患者がより気軽に外出することが可能となるように，酸素機器を搭載して HOT 患者に追従する移動体ロボットを提案している．そしてその際には，実用化を意識して学術的な新規性を追わずに実使用上の信頼性を重視する方針を取っている．すなわち現状で実績のある信頼性の高い既存技術を集積化することで実使用に耐える高い信頼性を有する移動体ロボットの実現を目指している．

そこで，我々は実用化を強く意識した実績のある技術としてハイパーテザー型インターフェイス（I/F）を応用した移動体ロボットの試作とそれによる研究開発を継続して行っている[(2)(3)(4)]．



Courtesy by Teijin PHARMA inc.

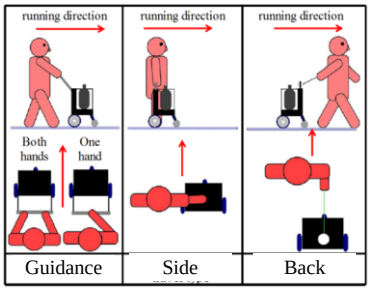
Fig.1 Home Oxygen Therapy patient's going out

ところで，ハイパーテザー型移動体ロボットではロボットが障害物と接触するなどの状況により，駆動輪が空転しユーザに追従できず，ユーザがそれに気づくまでテザーが伸び続けるという状況が起こりうる．この状況の回避策としてユーザの移動軌道を精度良く追従する制御手法[3]を適用することがあげられるが，この状況を本質的に回避するためには，テザーとは異なる剛体のハンドル状の剛体での操作 I/F の採用を検討する必要があると考えられる．

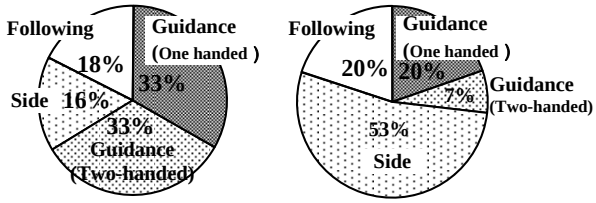
また，本研究の目的が特定の治療を行っている患者の生活支援機器の開発であるため，研究者の思い込みで研究開発を進めることなく，患者のニーズに応えることを常に意識する必要がある．

そこで，HOT 患者が望む形態の移動体ロボット像についてニーズを知ることを目的としてアンケート調査を行った．調査は HOT 患者の患者会が開催する第 18 回 J-Breath 医療講演会（2012 年 6 月開催，東京）[5]と北信フライングディスククラブ交流会（2012 年 9 月開催，長野）[6]で実施した．そのアンケートの内容と調査結果を図 2 に示す．図 2(a)ではロボットが先導する形式が望まれているが，(b)では伴走する形式が望まれていることがわかる．このように患者の病状や ADL が多岐に渡ることに起因して，特定の形式の移動体ロボットに希望が集中することはなかった．そのため，我々は患者のニーズを実際に調査すべく先導，伴走，追従といった複数の形式の移動体ロボットを試作して開発を進めている[7][8]．そういった中，我々は採取したアンケート中でも特に「現在使用している搬送カートと同等の取り扱いが可能なロボットがあるとよい」，「歩行補助器を兼ねた前方先導型のロボットも欲しい」

Q. What type of the mobile robot do you want to use?



A. Answers from the HOT patients



(a) Results in June 2012　　(b) Results in September 2012

Fig.2 Questionnaire and its results from the HOT patients.

といった回答（ニーズ）に対する答え（シーズ）を準備すべく，歩行支援機器と同形式の酸素機器搬送カートのようにユーザ前方で動作する先導型移動体ロボット（カート型移動体ロボット）の開発を行い，その評価を HOT 患者の患者会や医療関係者への操作体験会での聞き取り調査で実施している．

本稿では，このカート型移動体ロボットの開発で提案する操作 I/F の動作原理と効果を説明し，それによる移動体ロボットの動作性能について述べる．そして最後に HOT 患者によるユーザテスト評価の結果について報告する．

2. カート型移動体ロボット

2・1　カート型移動体ロボット概要　試作した移動体ロボットの外観を図 3 に，表 1 に主要諸元を示す．この移動体ロボットは我々が提案する操作 I/F による室内環境での操作性評価用の試作機である．本体に配置されたハンドル部をユーザが操作する I/F 部とし，ユーザがハンドル部を保持して動作する際に印加される作用力を検知する．その時にハンドル部に作用する力の大きさと方向によって左右駆動輪の回転速度を制御し，移動体ロボットが自在に移動できるようになっている．ハンドル部の高さは 765～945mm の範囲で 30mm ずつ 7 段階の調節が可能となっており，ユーザの身長に合わせて調節が可能である．

次に移動体ロボットのシステム構成を図 4 に示す．全体の制御はマイクロコンピュータ（CPU，ハイボット社製 SH2 Tiny Controller）を使用し，ハンドル部に設置された力センサ（Interlink Electronics 社製 FSR408）

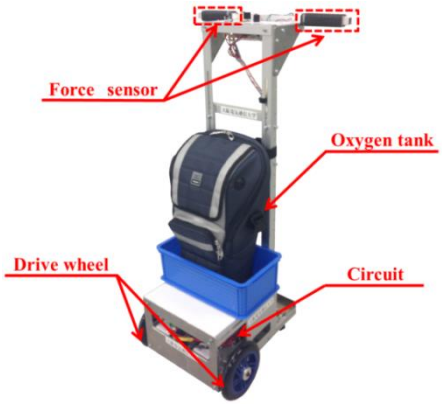


Fig.3 Our developed Guidance type mobile cart robot

Table 1 The developed mobile robot's specification

Dimension[W×D×H]	360×370×765～945[mm]
Weight	8.5kg(with batteries)
Power supply	Nickel metal hybride 12V／4200mAh Series connection
Actuation	DC-motor：TG-85R-SU Drive gear：Spur gear(55:14)
CPU	SH2/7047(CLK/44.2MHz)

からの出力電圧値と，最高移動速度と後述する過渡応答のインピーダンス調整のために設置した可変抵抗からの出力電圧値をCPU内部のAD変換回路を通して読み込む．また車輪駆動用のモータに取り付けたロータリーエンコーダのパルスを同じく CPU 内部のカウンタ回路でカウントする．それらの情報をもとに，駆動用モータに入力する PWM デューティを決定し，所望の動作制御を行う．

2・2　操作 I/F（ハンドル部）の動作原理　ユーザが移動体ロボットを操作する際に保持するハンドル部の構造の詳細を図 5 に示す．

ハンドル部は，アルミ製角パイプの左右端それぞれに前後方向と上方向に力センサを配置している．そしてそれらを覆うようにアルミ製角パイプで作るグリップ部品を取り付けた構造をとる．ハンドル部とグリップ部の間には，力センサとそれを固定するポリビニルテープが取り付けられており，グリップ部の内径はそれらの寸法分の0.5mm前後のクリアランスを許容するように設計されている．

設置された力センサは，前方向の作用力を検知するセンサ（Forward Force Sensor : FFS），後方向の作用力を検知するセンサ（Backward Force Sensor : BFS），下方向の作用力を検知するセンサ（Downward Force Sensor : DFS）の 3 種であり，それぞれが左右のグリップ部に配置され，前後方向の力は FFS と BFS の出力の差で検知される．このハンドル部を使って移動体ロボットを操作した時の力センサの出力信号を図 6 に示す．このように前後方向と左右方向の動作を判断するのに十分なダイナミックレンジを有する信号の取得が可能なことがわかる．

ところで，本研究で提案する形式の移動体ロボットでは，ユーザがロボットに寄り掛かる動作が日常的に起こりうる．また，ユーザが意識せずにグリップ部を握りしめる動作も頻繁に起こるため，これらの動作によってFFSやBFSに意図しない作用力が発生してロボットが誤動作することが考えられる．

これらに対して提案する操作 I/F では，ハンドル部に DFS センサを配置し，さらに前述したハンドル部を固いグリップ部で覆う構造を採用することによって，(1) ハンドル部への寄り掛かり動作，(2) グリップ部を握りしめる動作といった「移動とは関係ない動作」で発生するグリップ部への作用力でのロボットの誤動作を防止している．この誤動作の原因となる動作の仕組みを図 7 に示す．

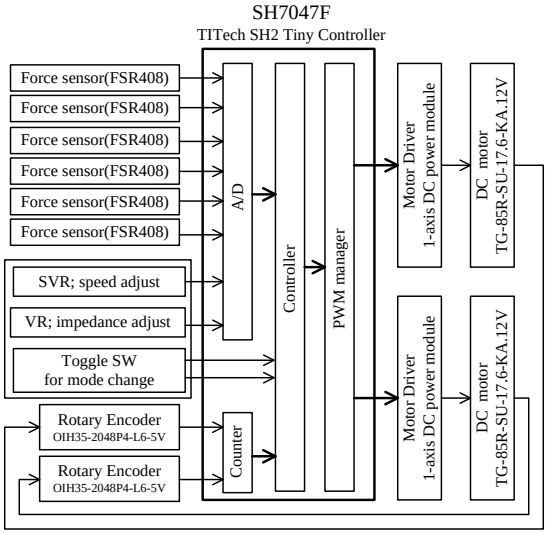


Fig.4 System block diagram of the mobile cart robot

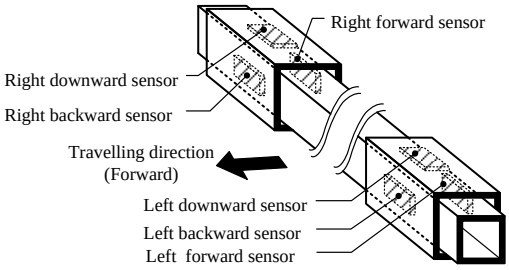
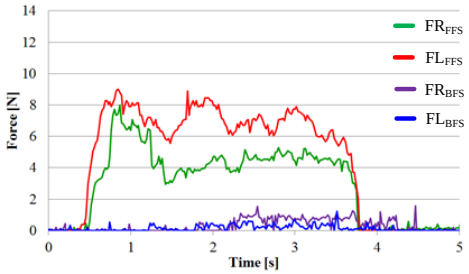
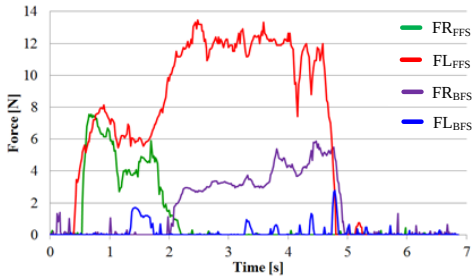


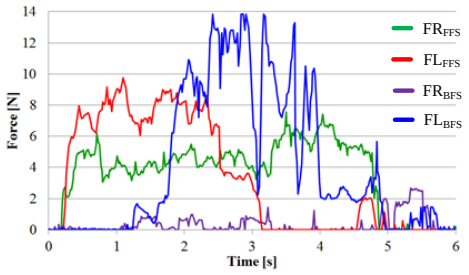
Fig.5 Handle part structure in detail



(a) Each force signal output : Forward movement



(b) Each force signal output : Right-turn movement



(c) Each force signal output : Left-turn movement

FR_{FFS} / FR_{FFS} : Output signal from Right / Left side FFS

FR_{FBS} / FR_{FBS} : Output signal from Right / Left side BFS

Fig.6 Signals of the force sensors for each motion

これからわかるように (1) の寄り掛かり動作はDFSセンサの出力値の大小で判別でき，移動時のそれを含めても移動方向が識別可能であることがわかる．そして (2) の動作はグリップ部の構造により回避可能となることがわかる．

これらに加えて問題になるのがグリップをひねる動作と移動する動作が混在する場合である．図 8 にユーザがグリップ部をひねる時のグリップ内部の動作の様子を示す．これからわかるように，ユーザが停止している時にグリップ部をひねると移動を意図していなくても移動方向の作用力を検知するFFSとBFSセンサ部に作用力が発生し，前後方向への移動を開始するという誤動作の原因となる．

ところで，後述する設計評価とユーザテストでの各動作時の力センサ出力値の代表的なものを図 9 (a) と(b)に示す．この測定結果からわかるように，一般的にユーザが移動体ロボットを操作する時には左右グリップ部の下方向に 2.0[N]以上の荷重を加えつつ（体重を加えつつ），前後方向に力が作用して移動することが確認できる．一方で，グリップ部をひねる動作だけでは図 9 (c) と(d)に示すように下方向への作用力が非常に小さい状態で，前後方向への作用力が発生していることが確認できる．

したがって，ユーザが移動する意図でロボットを操作する際には，下方向への作用力が 2.0[N]以上であるかどうかを判別基準とし，グリップ部をひねる動作による誤動作を回避することが可能となる．

以上をまとめると，本研究で提案する剛体ハンドルによる操作 I/F によってユーザが移動体ロボットを操作する際に発生する作用力を，ハンドル部に設置した力センサ群を使用して識別し，意図する前後左右の移動方向を決定することが可能となる．また，ユーザがロボットに寄り掛かる，グリップ部を意図せず握りしめる，グリップ部をひねる等の移動に関して意味を持たない動作での誤動作の回避を実現した．

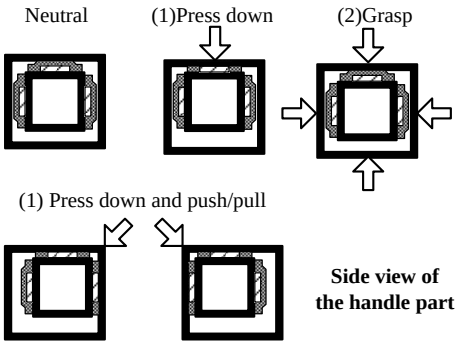


Fig. 7 False detection caused by unexpected user's operations

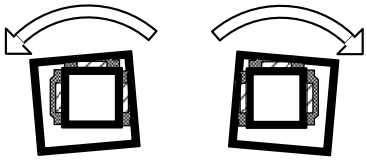
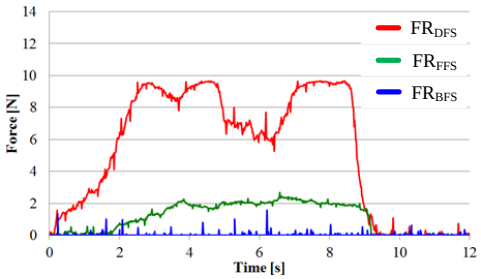
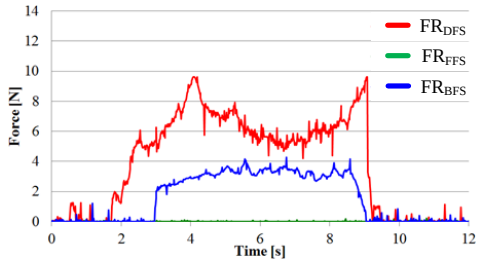


Fig. 8 False detection caused by twist motion

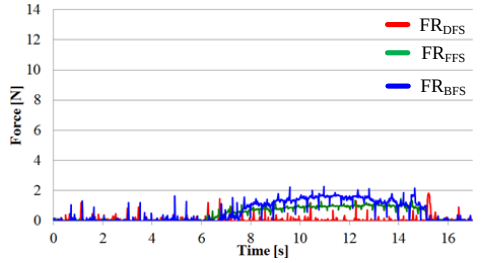
2・3　速度制御系の設計　前述のように移動体ロボットの左右ハンドル部には，ユーザがロボットを操作する際にハンドル部に加える作用力を検知するための力センサが配置されている．これらのセンサ信号を使用して，左右駆動輪の目標移動速度を算出し，その速度を達成するよう速度フィードバックを施すことで所望の移動動作を実現する．具体的には，左右ハンドル部に加わる力の値 F_L，F_R を使用して移動体ロボットの左右駆動輪の目標速度 $V_{L\text{-}ref}$，$V_{R\text{-}ref}$ を算出し，



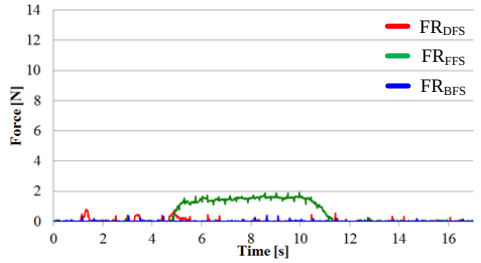
(a) Each force signal output : Forward movement



(b) Each force signal output : Backward movement



(c) Each force signal output : Twisting for forward



(d) Each force signal output : Twisting for backward

Fig.9 Signals of the force sensors for false detection

V_L と V_R を制御する．速度指令値 $V_{L\text{-}ref}$，$V_{R\text{-}ref}$ の生成は(1)式を使用して算出する．

$$\begin{cases} V_{L-ref} = K_S\left(F_R + F_L\right) - K_T\left(F_R - F_L\right) \\ V_{R-ref} = K_S\left(F_R + F_L\right) + K_T\left(F_R - F_L\right) \end{cases} \quad (1)$$

ただし，F_L，F_R は力センサの出力値を使用して

$$F_L = FL_{FFS} - FL_{BFS}\ ,F_R = FR_{FFS} - FR_{BFS}$$

と定義する．式中のパラメータ K_S，K_T はユーザの個人差によって異なる直進方向と旋回方向に関する感度係数である．この 2 つのパラメータを調整し，ユーザの感覚に合わせた速度調節を行う．

次に制御系のシステムブロックを図 10 に示す. 本研究で提案する制御系では，式(1)で算出した左右駆動輪の速度指令値に対して 2 自由度制御系を使用し，駆動輪の回転速度を制御している．左右駆動輪のフィードバック特性を決定する制御器 $C_{2\text{-}L/R}(s)$ には PID 制御器を使用し，入出力の応答特性を決定するフィードフォワード制御器 $C_{1\text{-}L/R}(s)$ には 1 次遅れ系フィルタを使用する．この $C_{1\text{-}L/R}(s)$ は移動体ロボットの加減速性能を直接調整する要素であるとともに，ユーザの操作入力の力成分から出力である移動速度成分へ積分するインピーダンスとなっている．この制御系での過渡応答特性の例を図 11 に示す. これは右駆動輪でのステップ応答の様子を示しており, これからわかるように $C_2(s)$ 単独では起動時定数が 50ms となっているが，$C_1(s)$ を使用することで，起動時定数を 2.0 s まで任意に調整可能であることを示している．これはユーザ毎に異なる操作時の応答パラメータが調整可能となることを示していることより，ユーザ個人の体格や日常動作機能の高低によって異なると考えられる移動体ロボットの所望の応答特性が調整可能な制御システムになっていることがわかる．

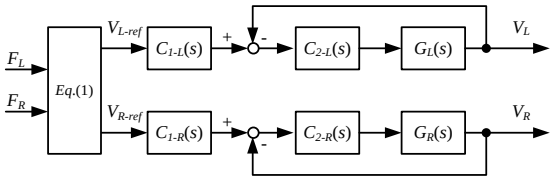


Fig.10 Control system block diagram of the mobile robot

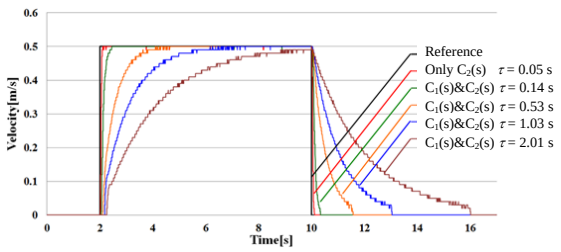


Fig.11 Step response of the 2-D.O.F.controller

なお，この $C_1(s)$ の特性はユーザが使用時に操作して所望の特性に調整できるように，図 4 にあるボリューム VR で変更可能である．移動速度については，ユーザの ADL によって所望の最高移動速度の値が変動するため，V_L，V_R の最高値を調整できるように図 4 にあるスライドボリューム SVR で調整できるようにしている．これによりユーザが移動体ロボットを使用する際に，これらの調整をユーザ自身が行うことができる．

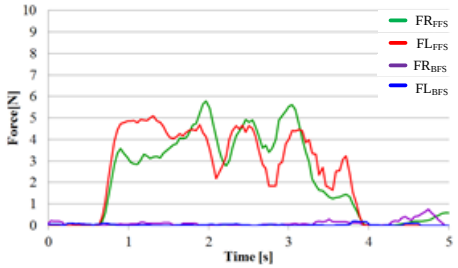
2・4　動作実験と性能評価　試作した移動体ロボットの動作実験を行い，その性能を評価する．直進時の動作実験では，屋内の平坦な路面上で移動開始して前方向に 3m 進み，その時にユーザが移動ロボットに加えた作用力を測定する．旋回時の動作実験では，前方向に 1m 進んだ後に右方向に 90° 旋回し，そこから 1.5m 前方に進んだ時にユーザが加えた作用力を測定する．この測定結果を図 12 に示す．

この結果からわかるように，ユーザ（被験者）は質量 8.5kg の移動ロボットを移動させる際に前進時・旋回時ともに左右合計 10N 弱の押力で移動している．したがって，本研究で想定している酸素機器を搭載した場合でも少ない作用力で移動可能であることがわかる．

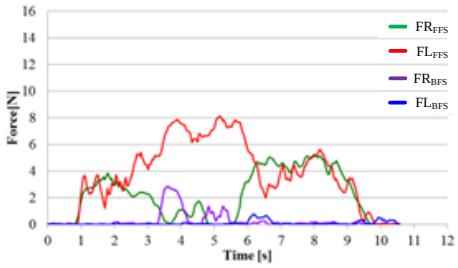
3.　ユーザテストによる評価

3・1　HOT 患者によるユーザテスト　HOT 患者によるユーザテストを東京清瀬喜望園の患者会である「いきいき教室」のご協力のもと 2013 年 9 月 26 日に実施した（図 13）．

本ユーザテストでは，開発した移動体ロボットを HOT 患者が実際に操作した上で患者自身がパラメータ調整を行う．そして患者自身が安定してロボットを操作できたと感じた時の各センサ値を記録し評価する．テストに協力して頂いた HOT 患者は男性 1 名（被験者



(a) Each force signal output : Forward movement



(b) Each force signal output : Right-turn movement

Fig.12 Experimental results of operation tests

A）と女性 1 名（被験者 B）の 2 名である．結果の第表例として被験者 A の操作による前進動作時の駆動輪の目標速度と実際の移動速度の様子を図 14 に示す．このようにユーザがロボットを操作する際にユーザとロボット間の相互干渉により周期的な入力信号が発生していることが確認できる．これらの信号に FFT 解析を施し，その周波数成分を調べた結果を図 15 に示す．

これより被験者 A がロボットを操作する際に主成分が 1.03 Hz の入力を加えているが，$C_1(s)$によるインピーダンス調整の結果，ロボットの移動速度が平滑化され，周期成分の影響が約 38%まで抑圧されることがわかる．この $C_1(s)$の調整は被験者自身が行っているため，ユーザにとって快適な操作が可能な調整結果になっていると考えられる．

3・2　フィードフォワード制御器の効果　HOT 患者によるユーザテスト結果から制御器 $C_1(s)$の作用に着目し，同様のユーザテストをサンプルを増やして実施したときの効果を調べる．図 16 は 22～24 歳の健常者 5 名，60～80 歳の健常者 5 名に 3.1 節と同様のテストを実施し，入力信号の周波数主成分と $C_1(s)$のカットオフ周波数の関係を示したものである．この結果より，体格差，年齢，ADL 等の違いによって被験者が異なる領域をとる傾向があり，それらを分類可能であることがわかる．これにより，ロボットの操作 I/F にインピーダンス成分の調整機能をすることでユーザの個人差に対応した親和性が高く使いやすい操作 I/F を構成可能であることがわかった．

4.　結言

本稿では HOT 患者の外出時の移動支援を目的とした移動体ロボットの操作 I/F 開発について報告した．

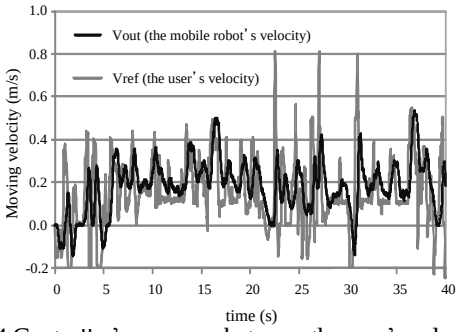


Fig.14 Controller's response between the user's velocity and mobile robot's velocity

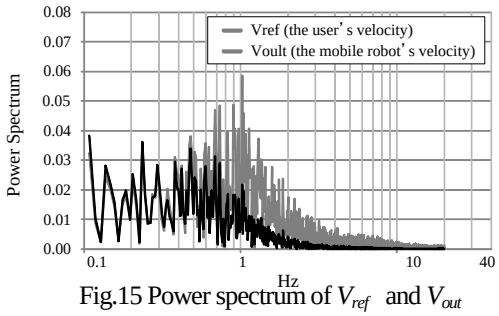


Fig.15 Power spectrum of V_{ref} and V_{out}

特に，ロボットの操作制御系に力成分を入力とした 2 自由度制御器によるインピーダンス成分調整の効果の有効性を示した．

Fig.13 User tests by HOT patients

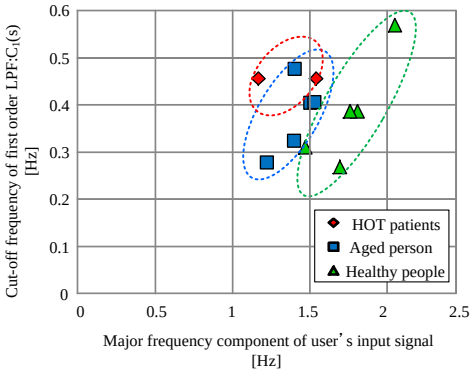


Fig.16 Relations between user's input signal and cut-off frequency of C1(s)

参　考　文　献

(1) 日本呼吸器学会肺生理専門委員会在宅呼吸ケア白書ワーキンググループ編集，“在宅呼吸ケア白書 2010”，厚生労働省呼吸不全に関する調査研究班，（社）日本呼吸器学会, 2010.

(2) M. Iribe, H. Matsuda, H. Aizawa, G. Endo, T. Takubo, “Study on a Practical Robotic Follower to Support Daily Life -A mobile robot development for Home Oxygen Therapy patients with the ‘Hyper Tether’ - ”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, pp.316-323, 2011.

(3) 遠藤，谷，福島，広瀬，入部，田窪，“在宅酸素療法患者の外出を支援する追従型搬送移動体の開発”，日本ロボット学会誌, Vol.30,　No.8, pp.779-787, 2012..

(4) 遠藤，入部，田窪，大平，“追従型酸素機器搬送移動体の開発，アシスティブ・プロダクツ”，公益財団法人テクノエイド協会, Vol. 8, pp. 14-16, Apr. 2013.

(5) NPO 法人日本呼吸器障害者情報センター，http://www.j-breath.jp/

(6) 北信フライングディスククラブ，http://www.geocities.jp/hokushinfd/

(7) G. Endo, M. Iribe, Y. Iemura, R. Ikeda, K. Onish, N. Maeta, E. F. Fukushima, S. Hirose, M. Ohira, T. Takubo. Study on a Practical Robotic Follower to Support Home Oxygen Therapy Patients -Questionnaire-Based Concept Evaluation by the Patients-, IEEE International Conference on Reha-bilitation Robotics (ICORR), C28, Jun. 2013.

(8) M. Iribe, G. Endo, N. Maeta, K. Onishi, R. Ikeda, Y. Iemura, T. Takubo, M. Ohira “Practical Assistive Robot Cart Development to Support Hot Patients”, Proceeding of the ISCIE / ASME 2014 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2014), 2014-116S, Hyogo, Japan, Jul. 2014.