

視線を用いたロボット操作システムの開発と評価

柚 本 夏 輝 * 林 田 泰 明 ** 井 上 浩 行 ***

Development and Estimation for Robot Operation System Using Human Gaze Information

Natsuki Yumoto, Yasuaki Hayashida and Hiroyuki Inoue

This paper proposes the eye-gaze input interface of a life support robot that is useful for improving the quality of life for the elderly and handicapped persons. This interface is easier to use for the heavily crippled persons. In this paper, the robot operation system including the proposed eye-gaze input interface is used to carry out the positioning task. The experimental results prove that proposed eye-gaze input interface is effective robot operation device for the crippled persons.

Key Words : medical and welfare assistance , eye-gaze input interface , positioning

1. 結 言

近年、高齢化が進み高齢者や障害者が増加する一方で、少子化も進んでいる。そのため、将来的には介護者が不足し、要介護者に対して十分な介護や生活支援がなされなくなる恐れがある。また、核家族化も進んでおり、高齢者や障害者が介護してくれる家族と離れて生活している場合もある。そこで、このような問題を解決する一つの手段として、高齢者や障害者の自立を支援する機器やロボットの実用化が期待されている。これらは、高齢者や障害者の使用を対象としているため、操作用のインタフェースは使用者の残存能力に合わせたものでなければならない。また、操作が単純で使用者にわかりやすいことも重要である。

小林ら¹⁾は、ロボットアームと皿の両方を動作させることによって食べ物を確実に把持する食事支援ロボットシステムを提案している。使用者はタッチセンサにより動作指示を行い皿の選択などを行うが、食べ物を口元に運ぶロボットアームの軌道は一定である。高橋ら²⁾は、使用者がホームロボットをレーザポインタや音声を用いて操作するシステム

を提案している。ロボットに汎用的な作業を行わせるには、使用者がレーザポインタ、ジョイスティックまたは音声などにより操作するのが一般的である。しかし、筋ジストロフィーや筋萎縮性側索硬化症などの重度肢体不自由者においては操作が困難である。そのため、久野ら³⁾は眼球運動を角膜網膜電位の変動として測定する視線インタフェースを提案している。落合ら⁴⁾は、モニタ上に配置された文字を注視して文字を入力する装置を試作している。しかし、視線により文字を入力する方式ではキーボード入力に比べて約9倍の時間がかかるため、操作性の観点からロボット操作には適さない。

本論文では、比較的障害が残りにくい眼球運動（視線）に注目し、視線でロボットを操作するシステムを構築する。視線でメニューやアイコンを選択する方式では、使用者が注視に費やす負担が大きく疲労の原因となるため、視線の動きに基づいてロボットの目標速度を生成する視線インタフェースを提案する。そして、提案する視線インタフェースの有効性を確認するため、視線入力とジョイスティック入力によりロボットの位置決め作業を行い、操作時間と位置決め精度から操作性を評価する。

2. 視線方向の検出

2.1 眼球の構造

眼球は直径約 24mm の球状構造物である。眼球の壁は3層の膜からできており、外側にあるのが硬

原稿受付 平成 18 年 8 月 31 日

* 阪神輸送機（株）

** 機械・制御システム工学専攻

*** 機械工学科

く強靱な外膜で、眼球を保護し一定の内圧によって眼球を球状に保っている。外膜の後部 5/6 は白色不透明の強膜で、前部の 1/6 は無色透明の角膜である。角膜には血管はないが知覚神経の終末がきており、角膜反射（角膜に触れると瞬きする反射）の受容器となっている。

2.2 眼球角度の測定

視線方向の検出については、眼球はその中心がほぼ固定された回転運動を行うため⁵⁾、何らかの方法で眼球運動（眼球角度）を測定すればよい。そこで、本研究では強膜反射法を用いたゴーグル式の眼球運動測定装置（竹井機器工業製）を用いる。

強膜反射法による眼球運動の測定原理を Fig.1 に示す。この方法は、眼球の白目（強膜）と黒目（角膜）の境界で反射率が異なることを利用したもので、黒目をはさんで2個の受光素子と中央に発光素子を配置する。発光素子からは微弱な赤外線が白目と黒目の境界に照射され、その反射光量を受光素子を用いて電圧に変換する。座標系を Fig.2 に示すように設定すると、眼球角度はピッチ角 β とヨー角 α として検出される。使用者がゴーグルを装着した様子を Fig.3 に示す。ゴーグルの右側に受光素子と発光素子が配置されており、右目の眼球角度を測定する。

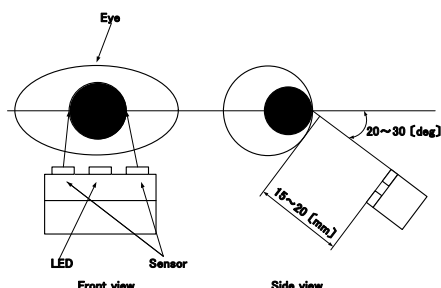


Fig.1 Limbus tracking

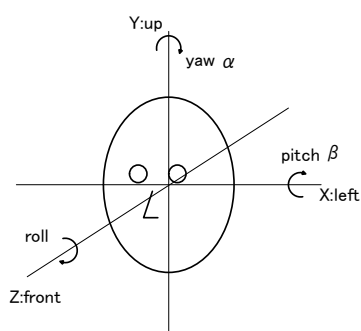


Fig.2 Definition of coordinate system

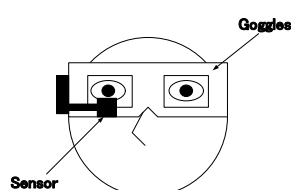


Fig.3 View of goggles

3. 視線インタフェース

3.1 概念

高齢者や障害者の自立を支援するロボットとしては、食事支援のように手の代わりや使用者に代わって遠くの物を動かしたりといった作業が考えられる。このようにロボットを生活環境に導入するためには、使用者の安全性と操作性の両方を考慮しなければならない。人間はロボットの速度ピーク位置や最大速度から心理的な影響を受けることが知られている⁶⁾。そのため、使用者がロボット動作中に恐怖や不快を感じないようにしなければならない。しかし、安全性を重視するあまりにロボットの動作速度を遅くすると作業に時間がかかってしまい、操作性が低下する。このように、ロボットの動作速度が安全性や操作性に及ぼす影響が大きい。

そこで、本研究では視線でメニューやアイコンを選択して予め設定されている目標速度を生成するのではなく、リアルタイムに測定される視線方向から目標速度を生成する。ロボットに行わせる作業としては、グラスやカップなどの軽量物を把持して初期位置から目標位置まで移動させることを考える。使用者がロボットを操作する手順を考えると、まず確認のために初期位置を見た後に目標位置を見るのが自然である。そこで、目標位置を注視することで大局的に目標位置近傍までロボットを移動させ、続いて視線方向を意図的に調節することでロボットを目標位置に停止させる。このように、自然に行われる視線移動を活用することで操作が直感的にわかりやすくなり、使用者の負担も軽減できる。

3.2 機能

安全性と操作性の観点から、ロボット操作の視線インタフェースに要求される機能としては、

- (i) 最大速度による迅速な移動
 - (ii) 滑らかな速度変化と正確な位置決め
- である。

提案する視線インタフェースについて説明する。まず、Fig.4 に示すように座標系を設定し、眼球の中心から距離 L の二次元平面上で、眼球の回転角度を 45° として視野を円で近似する。視線方向が貫く点を注視位置 $P(p_x, p_y)$ とすると、次式で表される。

$$\begin{aligned} p_x &= L \tan \alpha \\ p_y &= L \tan \beta \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 L がロボットまでの距離であれば、使用者は目標位置を注視することで移動距離 p_x , p_y を指示することができるため、眼球角度を測定することで移動距離を把握することができる。そこで、自然な視線移動からロボットの目標速度を定量的に生成す

るため、注視位置 $P(p_x, p_y)$ に基づいてロボットの目標速度 $v_d(v_{dx}, v_{dy})$ を生成する。ここで注意しなければならないのが、使用者からロボットまでの距離である。Fig.5 に示すように、同じ視線方向であってもロボットまでの距離の違いにより AB 間、CD 間の移動距離は異なる。このため、視線方向からロボットの目標速度を生成するためには、使用者から移動させる対象物を把持しているロボットまでの距離情報をシステムに与える必要がある。なお、ロボットの作業領域は鉛直平面内とする。

3.3 目標速度の生成

上述した 2 つの機能を実現するために、使用者が行う操作を移動操作と位置決め操作に分ける。移動操作とは、使用者が恐怖などを感じない速度でロボットを大局的に移動させる操作であり、位置決め操作とは目標位置にロボットを停止させるための操作である。

まず、移動操作におけるロボットの目標速度は次式で与える。

$$\begin{aligned} v_{dx} &= a_{ep} p_x \\ v_{dy} &= a_{ep} p_y \end{aligned} \quad (2)$$

v_{dx}, v_{dy} はロボットの目標速度、 a_{ep} は定数である。式(2)より、目標速度は移動距離に比例しており、

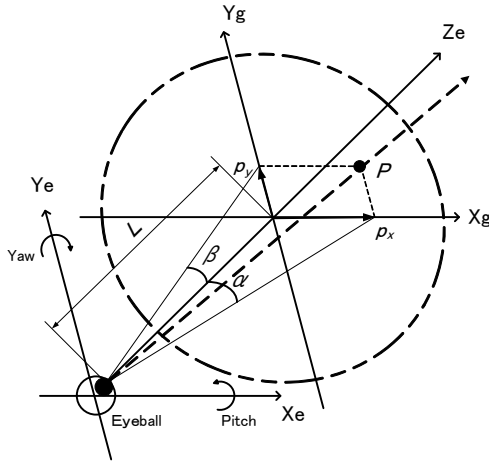


Fig. 4 Coordinate system in gaze direction

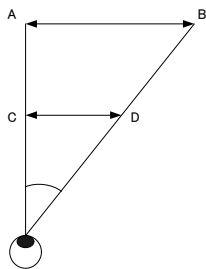


Fig.5 Relationship between position of robot and eye direction

定数 a_{ep} により最大速度を設定する。

次に、位置決め操作におけるロボットの目標速度は次式で与える。

$$\begin{aligned} v_{dx} &= a_{ed} \frac{dp_x}{dt} \\ v_{dy} &= a_{ed} \frac{dp_y}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

a_{ed} は定数である。式(3)より、使用者は一点を注視することで $v_{dx}=0, v_{dy}=0$ となり、ロボットを停止させることができる。これより、式(2)はロボットを大局的に移動させる粗動モード、式(3)は位置決めのために微調整を行う微動モードとする。

使用者はロボットを目標位置まで移動させるため、移動状況に応じて視線により両モードを円滑に切換えながら目標速度を生成しなければならない。そこで、粗動モードと微動モードを切換える方法としてモード切換変数 s を導入し、両モードを組み合わせたものを式(4)に示す。

$$\begin{aligned} v_{dx} &= a_{ep} p_x s + a_{ed} \frac{dp_x}{dt} (1-s) \\ v_{dy} &= a_{ep} p_y s + a_{ed} \frac{dp_y}{dt} (1-s) \end{aligned} \quad (4)$$

モード切換変数 s は零から 1 の実数であり、モード切換えにより生じる急激な速度変化を防止するとともに、滑らかな速度変化を実現するために用いる。モード切換変数が 1 のとき粗動モード、零のとき微動モード、零と 1 の間であれば両モードによりロボットの目標速度が生成される。

3.4 瞬きへの対応

眼球運動は速い眼球運動と遅い眼球運動に大別することができる。特に、粗動モードにおいてはサッケード運動という高速の跳躍的な運動が行われる。また、瞬きを操作のための視線移動として認識しないように対処する必要がある。

本研究では眼球運動の特徴を抽出するため、式(5)で表される Waveform Length(WL) により処理した値が、あるしきい値より大きければ注視位置を変更するためのサッケード運動または瞬きと判断し、しきい値より小さければ視線により操作がなされていると判断する。

$$WL = \sum_{k=1}^n |x_k - x_{k-1}| \quad (5)$$

ここで、 x_k は k 番目の眼球角度、 n はセグメントのサンプル数である。本インタフェースでは $n=40$ とした。WL の値がしきい値より大きければ、1 サンプル前の眼球角度を保持する。

4. 実験システム

4.1 ロボットの概要

実験に用いた直交型ロボットの概形を Fig.6 に示す。これは、ストローク 300mm, リード 6mm のボールねじ駆動方式の直動スライドテーブルを直交させたものであり、DC サーボモータによって駆動される。評価実験で使用するジョイスティックは2自由度で可動範囲は $\pm 15^\circ$ である。作業座標系は Fig.6 に示すように設定する。

4.2 制御システム

制御システムの構成を Fig.7 に示す。眼球運動測定装置によって検出された眼球角度に相当する電圧は、A/D 変換ボードを介してコンピュータへ送られる。スライドテーブルの位置はロータリエンコーダによって検出され、カウンタボードを介してコンピュータへ送られる。コンピュータ内で制御則に基づいて計算された制御信号は、D/A 変換ボードを介して DC サーボモータのドライバに送られ、スライドテーブルが駆動する。制御プログラムは C 言語によって記述され、サンプリングタイムは 0.59ms である。

なお、評価実験で用いるジョイスティックの傾きはロータリエンコーダによって検出され、カウンタボードを介してコンピュータへ送られる。

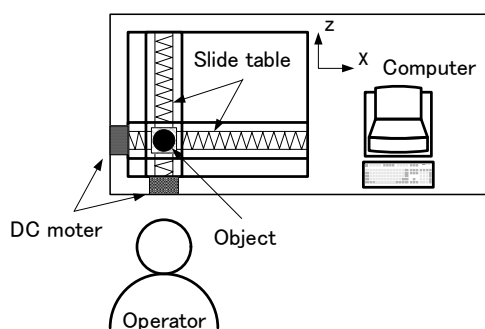


Fig.6 Experimental setup

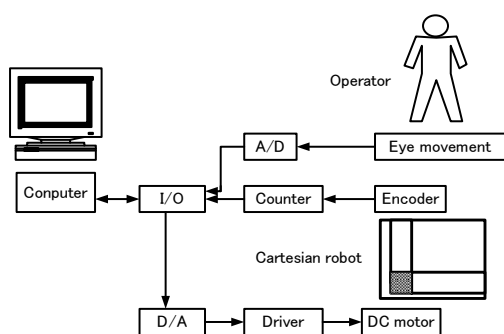


Fig.7 Experimental control system

5. 実験結果および考察

提案する視線インタフェースの有効性を調べるため、直交型ロボットを用いて位置決め作業実験を行う。被験者の前方 1m に直交型ロボットを配置し、 x 軸方向にスライドテーブルを 200mm 移動させる。このとき、被験者がスライドテーブルの初期位置から目標位置へ視線を移動させたときの眼球角度は約 11.3° である。被験者は 22 歳の男子学生である。

定数 a_{ep} , a_{ed} の設定方法について説明する。予備実験ではプログラム制御を行い、粗動モードにおいて被験者がロボットの動きから恐怖を感じない最高速度が 30mm/s, 微動モードにおいて微調整が可能な速度が 5mm/s であることを調べた。そして、操作中に最大速度を超えるような目標速度が生成されないようにするため、安全性を考慮して眼球角度が 15° のときに最大速度が生成されるよう $a_{ep} = 0.112$, $a_{ed} = 0.280$ とする。モード切換変数 s の値は、操作開始時は $s=1$ とし、 $p_x < 0.122 (\alpha < 7^\circ)$ となるとモードを滑らかに切換えるために、Fig.8 に示すように t 秒で $s=0$ となるように直線的に変化させる。

次に、視線による操作方法について述べる。被験者が初期位置に静止しているロボットを注視した状態を初期状態とする。被験者が移動操作として目標位置に視線を移動させると粗動モードにより速度が生成され、スライドテーブルが移動し始める。スライドテーブルが目標位置に近づくと速度を減速して位置決め操作に備えるため、被験者は視線を正面に移動させる。このとき、 $p_x < 0.122 (\alpha < 7^\circ)$ となると微動モードへの切換えが開始される。被験者は位置決め操作に備えて首を動かしてスライドテーブルを注視し、目標位置との位置関係を確認しながら視線を移動させて位置決めを行う。スライドテーブルは被験者が一点を注視することで停止する。本実験では、モードの切換えに要する時間を $t=5$ 秒とした。

5.1 基本実験

瞬きがロボット操作に及ぼす影響を調べるため、約 6 秒後に視線を右方向へ 10° 移動させ、瞬きを行った結果を Fig.9 に示す。Fig.9 より WL により処理された値を用いることで瞬きの影響が抑制できることがわかる。

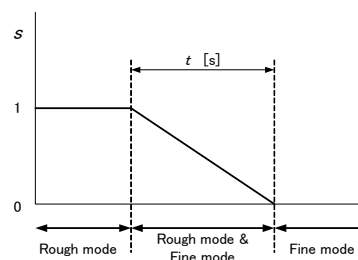


Fig.8 Change of mode by s

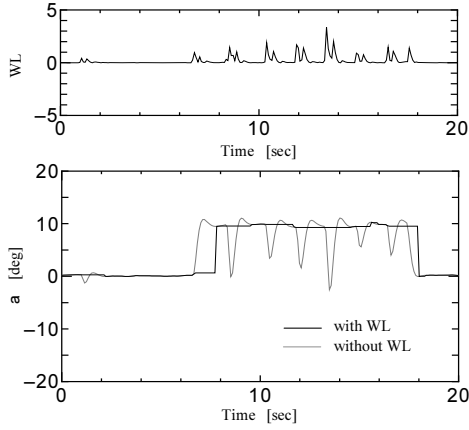


Fig.9 Influence of blinking

5.2 位置決め作業

被験者が視線入力により直交型ロボットの位置決め作業を行った結果を Fig.10 に示す。被験者は、約 7 秒後から視線を右方向に移動させ、粗動モードにより大局的にロボットを移動させている。その約 6 秒後に視線を正面に戻すことで微動モードへの切換えを開始している。このとき v_{dx} がほぼ零であるためにスライドテーブルは停止している。被験者は位置決め操作に備えて首を動かしてスライドテーブルを注視した後に視線を移動させて微調整を行い、約 50 秒後に一点を注視することでロボットを停止させている。位置決め精度は+2.48mm であった。

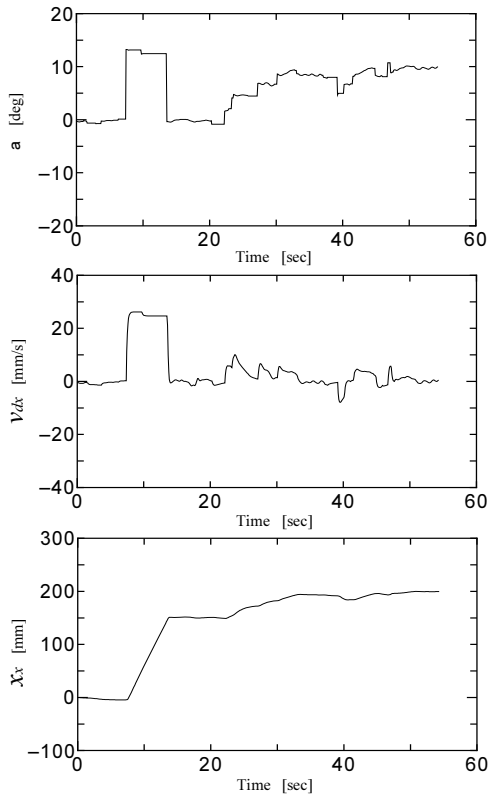


Fig.10 Experimental results of positioning task by eye gaze

5.3 評価実験

本ロボット操作システムの操作性を評価するために、従来の入力装置であるジョイスティックを用いて位置決め作業を行う。評価の観点には、位置決め作業における操作時間と位置決め精度である。評価実験では、ジョイスティックの傾きに基づき、次式により目標速度を生成する。

$$v_{dx} = a_{jp} \theta_x s + a_{jd} \frac{d\theta_x}{dt} (1-s) \quad (6)$$

ここで、 a_{jp} と a_{jd} は定数である。また、 θ_x はジョイスティックの傾きであり、可動範囲は $\pm 15^\circ$ である。 a_{jp} と a_{jd} は視線入力と同様に、ジョイスティックの傾きが 15° のとき最大速度の 30mm/s が生成されるよう $a_{jp}=2.0$, $a_{jd}=5.0$ とする。粗動モードから微動モードへの切換えはジョイスティックの傾きが $\theta_x < 7^\circ$ になると開始され、 $t=5$ 秒とした。被験者がジョイスティック入力により直交型ロボットの位置決め作業を行った結果を Fig.11 に示す。

被験者は、約 7 秒後からジョイスティックを右方向に傾け、粗動モードで大局的にロボットを移動させている。その約 5 秒後にジョイスティックを中央に戻すことで微動モードへの切換えを開始している。被験者は約 19 秒後からジョイスティックの傾きを調節しながら微調整を行い、約 48 秒後にジョイスティックの傾きを一定に保持することでロボットを

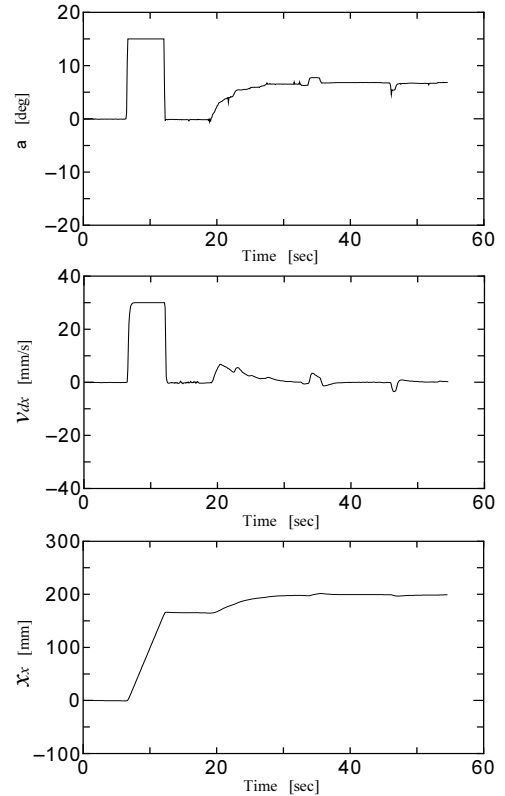


Fig.11 Experimental results of positioning task by joystick (Dominant hand)

停止させている．位置決め精度は $\pm 0.95\text{mm}$ であった．使用者が障害者であることを想定し，あごと足でジョイスティックを操作した結果を Fig.12 と Fig.13 に示す．位置決め精度は，あごで操作した場合が $+6.18\text{mm}$ ，足で操作した場合が $+3.15\text{mm}$ であった．なお，操作時間については大差がなかった．

視線入力と比較すると，手を用いてジョイスティックを操作した結果が操作時間ならびに位置決め精度から最も操作性が優れていることがわかる．理由としては，Fig.11 より位置決め操作においてジョイスティックを滑らかに傾けて目標速度を生成しているためである．これは，視線入力では意図的に一定の速度で視線を動かすには限界があるため，位置決め操作に時間を費やすことになり，位置決め精度にも限界がある．しかし，あごや足を用いてジョイスティックを操作した場合は，手に比べて位置決め精度が低下している．あごで操作する場合には，ジョイスティックを傾けるためには顔を動かすか傾けなければならないために，操作中に目の位置が動いてしまい目標位置とスライドテーブルの位置関係を正確に把握することができなかったために，位置決め精度が最も悪くなっている．足で操作する場合には，手に比べると思い通りに動かしてジョイスティックの傾きを細かく調節することができなかったために，視線入力と同程度の位置決め精度となっている．よって，ジョイスティック入力においても操作する人体部位によっては操作性が低下する恐れがあるため，使用者の残存能力に適した入力装置を用いなければならない．

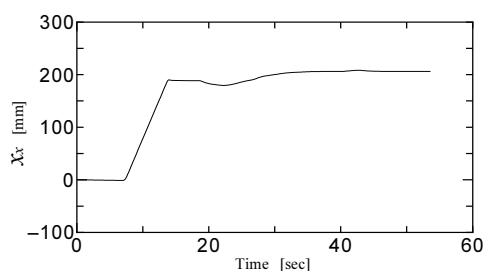


Fig.12 Experimental results of positioning task by joystick (Chin)

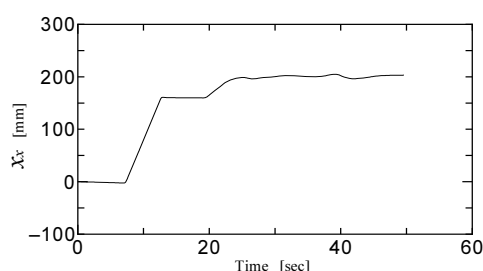


Fig.13 Experimental results of positioning task by joystick (Foot)

以上より，重度肢体不自由者の使用ならびに厳密な位置決め精度を必要としない作業であれば，提案する視線インタフェースは有効である．

6. 結 論

本研究は，高齢者や障害者の自立を支援する機器やロボットを操作する手段として，比較的障害が残りにくい眼球運動に着目し，視線によりロボットを操作する視線インタフェースを提案した．提案する視線インタフェースは，使用者の負担を軽減するために，視線でメニューやアイコンを選択するのではなく，視線の動きに基づいてロボットの目標速度を生成する．具体的には，移動操作を行う粗動モードと位置決め操作を行う微動モードを設定し，作業の進行に応じて自然な視線移動から両モードを切替えることにより，操作目的に適したロボットの目標速度を定量的に生成する．

具体的なロボット操作システムとして，直交型ロボットシステムに視線インタフェースを組み込んだロボット操作システムを構築した．実験としては，被験者が視線ならびにジョイスティック入力よりスライドテーブルを目標位置まで移動させる位置決め作業実験を行った．その結果，滑らかで細かい調節が可能なジョイスティック入力が視線入力に比べて操作性が優れていることがわかった．しかし，使用者の残存能力によってはジョイスティック入力においても操作性が低下するため，提案する視線インタフェースは重度肢体不自由者に対する一つのロボット操作手段として有効であることを確認した．

参 考 文 献

- 1) 小林宏，椎葉太一，小西健太郎：食事支援ロボットシステムの開発と定量的評価，機論 C 編，70，699 (2004)3252-3259
- 2) 高橋伸寿，梅田和昇，渋谷典之：レーザポインタを用いたホームロボット操作システムの構築（第2報音声認識の併用によるシステム構築），ロボティクス・メカトロニクス講演会 '03 講演論文集，(2003) 1A1-3F-C6
- 3) 久野悦章，八木透，藤井一幸，古賀一男，内川嘉樹：EOGを用いた視線インタフェースの開発，情報処理学会論文誌，39，5(1998)1455-1462
- 4) 落合積，石松隆和，高見修，松井稜治：目の動きを利用した身障者用文字入力装置の試作，機論 C 編，63，609 (1997)1546-1550
- 5) 田崎京二，大山正，樋渡涓二：視覚情報処理，朝倉書店，369
- 6) 池浦良淳，大塚英樹，猪岡光：皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察，日本人間工学会誌，31，5 (1995)355-358