

顔の視覚情報処理を用いた知的車椅子

足立佳久* 中西 知* 久野 義徳*
島田伸敬* 白井良明*

Intelligent Wheelchair Using Visual Information from the Human Face

Yoshihisa Adachi*, Satoru Nakanishi*, Yoshinori Kuno*,
Nobutaka Shimada* and Yoshiaki Shirai*

With the increase in the number of senior citizens, there has been a growing demand for human-friendly wheelchairs as mobility aids. This paper proposes the concept of an intelligent wheelchair to meet this need. It can understand human intentions by observing the user's nonverbal behaviors and can move as the user wishes with minimal human operations. It also describes our experimental robotic wheelchair system. Human intentions appear most on his/her face. Thus, the experimental system observes the human face, computing the direction of the face. As the first step toward the intelligent wheelchair, we have performed experiments on controlling the system's motion according to the direction of the face. Experimental results prove our approach promising.

Key Words: Intention Understanding, Face Direction, Power Wheelchair, Human Interface

1. はじめに

身体の不自由な人にとって車椅子は重要な移動手段である。また、高齢化社会の到来により、日常生活に介助を必要とする高齢者が増えるため、より安全で快適に使用できる車椅子の需要がますます高まると思われる。そこで、人間にとってより使いやすい車椅子の実現に向けて、近年、ロボットの分野でさまざまな車椅子の研究がなされている[1]~[3]。これらの知的車椅子の特徴は、以下の二つにまとめることができる。まず、一つめは、車椅子が外界センサを持つことにより、周囲の環境を認識し、人間がわざわざ細かな操作を行わなくても、自律的に障害物を認識し、それを避けてくれるという点である。このような障害物回避の研究は自律移動ロボットの分野でさかに行われており、乗っている人間の操作に対する負担を減らし、安全な走行を行うことができるため、人間にとって使いやすい車椅子のための重要な要素の一つといえる。二つめとしては、操作をできるだけ簡単にするにより、車椅子をより使いやすくしているという点である。これは、操作レバーでの電動車椅子の操作が困難な身体の不自由な人に対して非常に有効であると考えられる。音声やディスプレイ画面上のマークを視線で指示してコマンドを入力する方法などが検討されている。

このように知的車椅子の研究は活発に進められているが、上に述べた二つの機能とも、まだ十分なものができているとはい

えない。そこで、本研究では二つめのヒューマンインタフェースに問題を絞って検討を行う。ヒューマンインタフェースについては、先に述べたように音声や視線を使うなど、モダリティを広げることが検討されている。しかし、車椅子の操縦の際に必要なフィードバックの操作をできるだけ簡単にするという観点からの検討が欠けている。自動車ではハンドルを切っただけで曲がるが、曲がり具合を見ながら、ハンドルを戻していかなければならない。車椅子の操作レバーでも同様に、曲がり具合を見てレバーの位置を調整しなければならない。操縦者はこのようなフィードバックの操作を注意して意識的に行わなければならない。音声入力などでも、適当なところまで曲がったら直進に切り替えたり、曲がりが足りなかったり曲がり過ぎのときには修正するなどの操作を行わなければならない。つまり、車椅子に乗っているときには常に車椅子の動きを認識し、それに対して意識的に調節のための操作を行わなければならない。これは搭乗者には負担である。

そこで、本論文では搭乗者が注意を払って意識的に動作を行う必要性をできるだけ減らす方法を検討する。具体的には、その方法としてこれまで検討されていない搭乗者の顔の向きを利用することを提案する(ここでは車椅子を基準に顔の向きを考えるので、身体ごと向きを変えても顔の向きが変わったことになる)。車椅子に乗っていて曲がりたければ、曲がりたい方を見るのは当然の動作である。そして、車椅子が曲がってくれば、特に意識しなくても顔の向きを正面に戻していくのが普通である。したがって、顔の向きを求めて車椅子の制御に利用すれば、

原稿受付 1998年4月10日

*大阪大学工学研究科

*Graduate School of Engineering, Osaka University

顔を動かすのは意識的な動作ではあるが、車椅子の走行方向に対するフィードバックの操作という点からは、搭乗者はほとんど無意識にその行動を行うことになる。

実際にこの方法を利用する場合には以下のような問題が考えられる。まず、曲りたい方向を向くという動作が車椅子が曲がるという動作より、当然ながら先行しなければならないという点である。これについては、曲りたい場合には、曲がる前に事前に確認のためにその方向を見るのは自然な動作と考えられるので、搭乗者に車椅子の特性を理解しておいてもらえば問題は解決されると考えられる。すなわち、曲りたいときには、意識的にその方向を向いてもらうということである。もう一つの問題は、「曲りたいときにその方向を向いて下さい」というのはヒューマンインタフェースとして自然な要求だが、「曲がる時以外には顔を動かさないで下さい」というのは、要求できないということである。搭乗者は顔をいろいろなときに動かすであろうから、車椅子システムの方で操縦の意図をもって顔を動かしたときと他の場合を識別する必要がある。もちろん、曲がろうと思っていないのに曲がり始めた場合に、その方向と逆の方に顔を回すという意識的なフィードバック操作で問題を解決することはできる。しかし、そのような意識的な行動ができるだけ不要なものを目指す。本論文では、顔の向き認識結果のスムージング処理と、外部環境の情報を利用して、曲がる意図で顔を動かしたかどうかを判定する方法を提案する。このように外部に現われた行動から意図を認識する研究としては、Pentlandらの開発したシステムがある[4]。このシステムは、自動車を運転している人間の動作を観察し、隠れマルコフモデルを用いて、その動作に含まれる人間の意図を認識し、人間がこれから行おうとしている動作に対して支援するものである。車が対象ということで、人間の行動認識結果から実際に車を動かすというものではないが、本研究に通じるものがある。

以上のように、提案の知的車椅子では顔の向き認識が重要な要素になる。顔の向き認識方法としては、従来、頭部にセンサを装着することにより、三次元空間中での頭部の位置と姿勢を検出するものがあるが、人間に検出装置の装着を強制することは好ましくない。そこで、ここでは非接触な認識方法として、ビデオカメラでとらえた画像を利用する方法を用いる。これにより、人間の自由度が増し、動作中の違和感を少なくすることができる。人間の顔の向きを認識するために視覚情報処理を用いた研究には顔の3個の特徴点を利用したものが多い[5][6]が、1個の特徴点のノイズに対して影響を受けやすいと考えられる。そこで、本研究ではより多くの特徴点を用いる方法を提案する。目や鼻、口などの顔の特徴の部分に多数の特徴点を取り、それらが三次元空間内で同一平面上にのっていると仮定する。そして、それらを画像上で追跡し、その位置変化を検出することで、平面の運動をアフィン変換を用いて表現し、それにより、平面の法線ベクトルの方向、すなわち、人間の顔の向きを推定する。

本論文では、知的車椅子のシステム構成を示し、提案する知的車椅子の実現に必要な要素技術として、顔の向きを認識する手法について述べる。そして、実際に開発した車椅子システムによる実験結果を報告する。

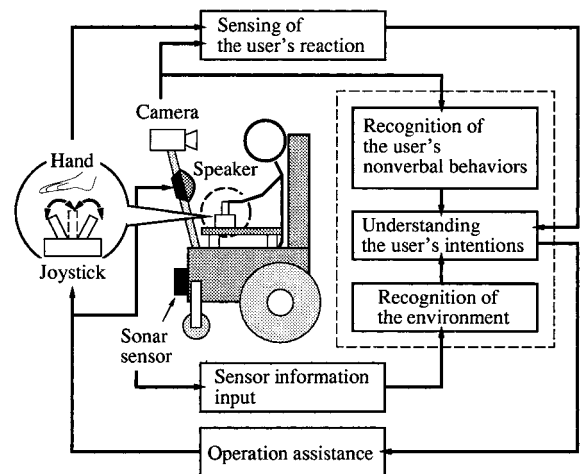


Fig. 1 System configuration

2. 知的車椅子のシステム設計

2.1 システム構成

前章で述べたように、知的車椅子には障害物を避けるなどの自律的行動能力と使いやすいヒューマンインタフェースの二つが必要である。提案する知的車椅子でも、この両者を実現する予定である。現在検討している知的車椅子のシステムの基本的な構成を Fig. 1 に示す。

自律的な行動としては、超音波センサを利用して、障害物を避けたり、壁づたいに走行したりするものを開発中である。将来的には視覚情報による外界認識の利用も考えていきたい。

自律的行動に関しては開発中であり、本論文の範囲外として、ここではヒューマンインタフェースの部分について述べる。ヒューマンインタフェースとしては、顔の向きという人間の非言語的行動を認識して、それから人間の意図を推測して車椅子の行動決定に利用する。提案システムの基本は、顔の向きを認識して、その方向に車椅子を動かすということである。この際問題になるのは、前節で述べたように、車椅子の操作を意図した顔の動きとそうでない顔の動きとを識別することである。操作を意図しないで顔が動く場合としては以下の場合があると考えられる。

- (1) 車椅子の振動に伴い動く場合
- (2) ちらちらと辺りを見回す場合
- (3) 壁にはってある掲示を見るなどの、特定のものを意識的に見る場合
- (4) その他

以上の場合の顔の動きと車椅子操作の場合の動きを識別することが、意図の認識になる。今回は、これを行うために以下のように考えた。

(1) による顔の動きは小さいと考えられる。そこで、顔の向き認識結果にしきい値を設け、小さい変化は無視するようにする。

(2) については、顔の向き認識結果を時間軸にそって、スムージングすることで対応する。顔の向き認識は 30 フレーム

ム/秒の実時間で行うが、その結果で直接車椅子を動かすのではなく、過去の何枚かのフレームとの平均結果で車椅子を動かすことにする。これは1の場合に対しても効果がある。

(3)については、外部環境の認識結果の利用を検討する。例えば、超音波センサで障害物があると分かっているならば、その障害物のある方に顔を向けても無視するというようなことである。今回は超音波センサによる外界認識が開発中なので、走行環境の地図データを車椅子に与えて、これを模擬することにした。

(4)については、人間が顔を動かす場合には多くの可能性があるため、それらすべてを考えるのは困難である(1)から(3)までへの対応策により識別できるものもあるだろうが、識別できないものも当然ある。そのような場合に対しては、今回は、意図認識結果が違っていた場合には、人間が思っていなかった方向に動き出すので、それを修正するように顔を向けるということで対応することにする。

「この車椅子は行きたい方を見ればそちらに動きます」とユーザに告げておくと、ユーザは車のハンドルを急に切ったり戻したりしないように、曲がりたい方向をゆっくりと安定して向くことが期待できる。これは意識的に動作してもらうことになるが、これに対する負担は小さいと思われる。曲がり出すと顔の向きを正面に戻してこなければならないが、これは事前に指示しなくても自然に出る動作だと考えられる(2)への対応は、車椅子を操作する場合は「ゆっくりと安定して顔を動かす」という仮定に基づいている。すなわち、細かい動きを無視することによって、操作を意図した動きを識別している。スムージングを長い時間に対して行えば、この識別はより確実になる。しかし、ユーザには曲がりたい方を見つめてもらうという意識的な動作への要求が強くなってしまふ。また、顔を向けてもなかなかそちらに行かないのは使用感が損なわれる。さらに、頻りに曲がる必要のあるような場所や、突然現われた障害物を避けるような場合には、顔の向きの変化にすぐに反応してもらう必要がある。将来的には、最後の場合については顔の向きによる操作ではなくて、自律的な行動の導入が必要だと考えている。しかし、すばやい反応というのは操作性では重要である。これについては、細かい動きには反応せず、かつ反応時間の遅れも問題にならない程度になるようなスムージング時間を実験により調べることにする。

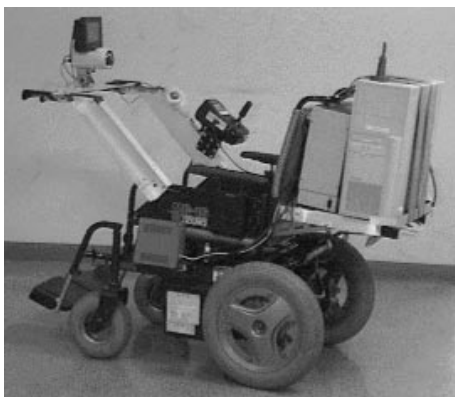


Fig. 2 System overview

2.2 実験システム

以上の機能の実現に向けて、知的車椅子の実験システムの開発を行っている。現在の実験システムの主な構成要素は、計算機で制御できるように改造した電動車椅子(SUZUKI MC-16S)、カメラ(SONY EVI-G20)、動画をリアルタイム処理するための高速演算処理装置トラッキングビジョン[7]、これらを制御するための計算機(IBM/PC, OS: FreeBSD 2.2.5, CPU: MMX Pentium 233MHz)である。システムの外観をFig. 2に示す。

3. 視覚情報処理を用いた顔の向き認識

2章で述べた知的車椅子の実現のためには、人間の意図認識が重要な要素となる。そこで、車椅子に乗っている人間の意図の認識に向けて、その基本になるものとして、人間の行きたい方向、注意がどこに向いているかを知るために顔の向き認識を行う。以下に単眼カメラから入力される動画を処理することにより、車椅子に乗っている人間の顔の特徴(目や鼻、口など)を追跡し、顔の向き情報を獲得する手法について述べる。

3.1 顔の特徴の追跡

動画処理の最も基本的な問題は、画像中で変化している部分を検出し、追跡することである。現在の画面のある部分が、次の画面のどこに対応するかを決定することは容易ではない。この対応づけを行う手法の一つとして、相関法がある。相関法とは、注視領域近傍で探索を行い、追跡対象の参照画像と相関度が最も高い領域へ対象が移動したとして、その移動ベクトルを得る手法である。顔の各特徴の追跡には、注視領域を実時間で明度相関演算の処理ができるシステム、トラッキングビジョン[7]を用いる。

相関度を評価する式として、SAD(Sum of Absolute Difference)を用い、

$$Dist(i, j) = \sum_n \sum_m^{ysize \times xsize} |f_r(m, n) - f_c(m + i, n + j)| \quad (1)$$

と定義する。ここで、 $Dist(i, j)$ は点 (i, j) における相関誤差値を、関数 $f_r(x, y), f_c(x, y)$ はそれぞれ参照画像と候補領域内における点 (x, y) の輝度値を、 $xsize \times ysize$ は参照画像のサイズを示す。式(1)の $Dist(i, j)$ の値が最も小さくなった点 (i, j) に対象が移動したとして追跡を続ける。本論文では、カメラに向かって正面を見ているときの人間の顔の画像を用意し、その画像内で各特徴の位置を与え、その位置での各特徴の画像を参照画像として用いることにより追跡を行うことにした。なお、おのおのの特徴の参照画像の大きさは $64[\text{pixel}] \times 64[\text{pixel}]$ とし、そのうちの $3[\text{pixel}]$ おきの $16[\text{pixel}] \times 16[\text{pixel}]$ を追跡に用いる。また、探索領域の大きさは $128[\text{pixel}] \times 128[\text{pixel}]$ とした。

3.2 アフィン変換を用いた顔の動きの表現

顔の向きを推定するにあたって、本手法では、目や鼻、口などの顔の各特徴は三次元空間内で同一平面上にのっているという仮定を用いる。この平面を以下、平面 P とする。つまり、平面 P の法線ベクトルの方向を求めることが人間の顔の向きの推定となる。そこで、画像上での顔の各特徴を追跡することで、

それらの位置の変化をアフィン変換 [8]~[10] を用いて表現し、それにより平面 P の三次元空間中の運動を求め、法線ベクトルの方向の推定を行う。

平面 P が光軸に垂直なときの顔の各特徴の画像上での座標をそれぞれの初期位置とする。追跡する特徴の数を M 個 (実験システムでは $M=10$) としたとき、その初期位置を $x_k = [x_k, y_k]^T$, ($k = 1, 2, \dots, M$) とおく。人間が顔の向きを変化させるとき、画像平面上で各特徴の位置は移動する。顔の各特徴は同一平面上にのっけていて、その位置関係は不変であると仮定する。したがって、それらの移動後の位置 $x'_k = [x'_k, y'_k]^T$ と初期位置 x_k の関係は式 (2) のように回転、拡大・縮小、せん断を表すアフィン変換行列と並進ベクトルで表現することができる。

$$\begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

平面 P の初期位置を与えているため、式 (2) のパラメータから平面 P の三次元空間中の運動を求めることができる。

式 (2) のパラメータは最小自乗法により推定する。このとき、画像上のノイズの影響を受けたり、他の物体に隠されたりして、正しく追跡されていない特徴の影響を取り除く必要がある。

まず、追跡で得られた x'_k と初期位置 x_k より、最小自乗法で式 (2) のパラメータの推定を行い、残差の自乗

$$\|e_k\|^2 = \|x'_k - (\hat{A}x_k + \hat{t})\|^2 \quad (3)$$

を求める。ここで、 $\|e_k\|^2$ が閾値より大きい特徴 k は正しく追跡されなかったものとみなし、それ以外の特徴を用いて、パラメータの再推定を行う。これにより、正しく追跡されなかった特徴の影響を減らすことができる。推定されたパラメータをもとに各特徴の探索領域の位置を決定することで、各特徴の位置関係に拘束を与え、追跡を続ける。通常、特徴が 3 個あれば式 (2) のパラメータを求めることができるが、追跡を行った顔の特徴 10 個のうち 6 個以上が取り除かれた場合は、推定されたパラメータの信頼性が低いものとし、前フレームでの探索領域を用いて追跡を行う。

3.3 アフィンパラメータを用いた顔の向きの認識

以下に、推定された式 (2) のアフィンパラメータを用いた顔の向きの認識について述べる。

平面 P 上に円を考える。平面 P が三次元空間中で傾きを変化させるとき、平面 P 上の円を画像平面に直交投影すると楕円になる (Fig. 3)。

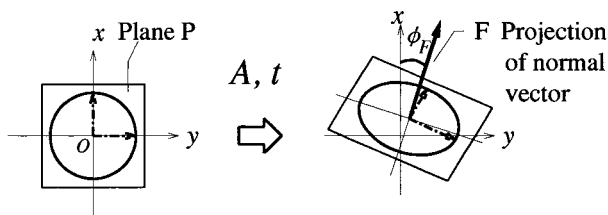


Fig. 3 Projection of the normal vector

顔の各特徴を追跡することで得られた式 (2) のパラメータにより、平面 P 上の円は楕円へ写像される。この楕円の短軸の方向を α とすると、 α は式 (2) のパラメータを用いて、次のように表すことができる。

$$\tan 2\alpha = 2 \frac{a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22}}{a_{11}^2 + a_{12}^2 - a_{21}^2 - a_{22}^2} \quad (4)$$

平面 P の法線ベクトルは画像平面上の楕円の短軸の方向に投影されるため、法線ベクトルの投影 F の方向角 ϕ_F は α となる。式 (4) からこれを求めると、 ϕ_F としては 180 度異なる正反対の 2 方向の解が得られる。これはアフィンパラメータのみでは顔の上下運動の区別、左右運動の区別ができないからである。ここでは、この二つの解から以下のようにして一つを選択する。本実験システムでは、車椅子に乗っている人間の顔をとらえるカメラは顔の位置より少し低い位置にとりつけられている。したがって、人間が正面を向いているとき、カメラからは顔が 15 度上を向いている画像が得られる。そこで、車椅子に乗っている人間は、だいたい走行中は正面付近を向いているため、二つ求まる ϕ_F のうち上向きの方を選択することにする。ただし、人間が少し下を向いた場合にも対応できるように、前フレームとの ϕ_F の連続性も考慮する。すなわち、顔が上向きから次第に下がってきた場合には、二つ求まる ϕ_F のうち下向きの解でもこれまでの値と連続する方を選択する。

以上より、法線ベクトルの画像への投影 F の方向が得られた。次に、三次元中での法線ベクトルの方向を求める。得られた楕円の長径を a 、短径を b とすると、この楕円は平面 P 上の円を画像平面に直交投影したものであるため、平面 P の法線ベクトルと光軸のなす角 θ_F は次のようになる。

$$\theta_F = \cos^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (5)$$

以上のようにして得られた平面 P の法線ベクトルの角度 ϕ_F, θ_F を用い、顔の向きを表現することができる (Fig. 4)。Fig. 5 に顔の各特徴の位置と平面 P の画像の変形、法線ベクトルの方向を示す。

3.4 顔の向きの認識実験

上記の方法で顔の向きが正しく求められているか実験で確認した。男性五人について、正面、および左右 15, 30, 45 度を向いてもらい、一人一つの方向あたり 100 フレームのデータを

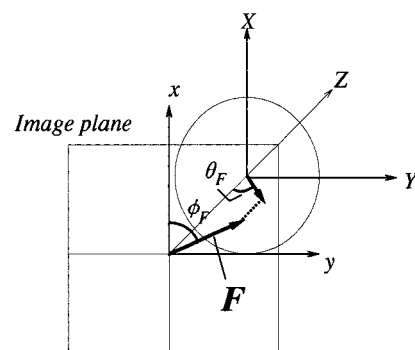


Fig. 4 Normal vector direction

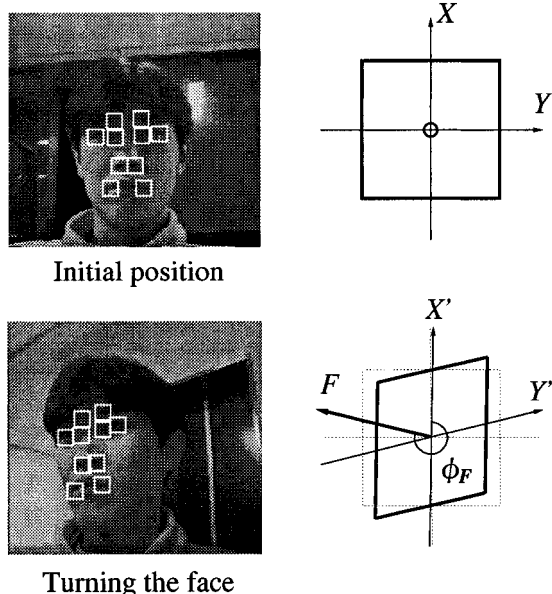


Fig. 5 Face direction computation

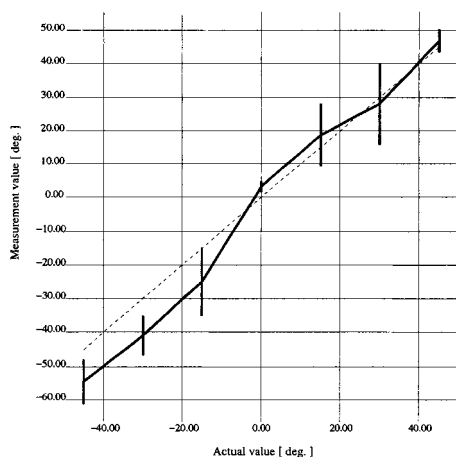


Fig. 6 Face direction computation result

集め、顔の向きを求めた。五人の結果（各方向 500 データ）の平均を Fig. 6 に示す。この図では標準偏差を縦線で示してある。提案システムでは、顔の向きに正確に車椅子の方向を合わせるというのではなく、顔の向いている方向に車椅子を動かしていけばよいので、その目的に対しては十分な情報がフレームレートで得られることが確認できた。

4. 実験結果

3 章で述べた手法によって得られる顔の向きの情報を用いて車椅子を操作する実験を行った。実験結果を以下に示す。

4.1 実験システムにおける顔の向きの利用法

実験システムでは、以下の規則を用いて、車椅子の操作を行った。

まず、人間の顔が左右をどれだけ向いているかを判断するのに、3 章の手法で得られた顔の向きを水平面に投影した角度を

Table 1 Operation rule

If	$\bar{\psi}_F > \pi/6,$
then	turn right proportional to $\bar{\psi}_F.$
else if	$\bar{\psi}_F < -\pi/6,$
then	turn left proportional to $\bar{\psi}_F.$
else if	$\bar{\theta}_F < \pi/12,$
then	stop.
else	
then	go straight.

用いることにする。顔の左右方向への向きは、カメラは水平面より 15 度上を向いていることを考慮に入れ、次のように表すことができる。

$$\psi_F = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_F \cos \phi_F}{-\sin \theta_F \sin \phi_F \sin \frac{\pi}{12} - \cos \theta_F \cos \frac{\pi}{12}} \right) \quad (6)$$

この角度 ψ_F を毎フレーム（30 フレーム / 秒）の画像に対して計算する。そして、その時点を含め過去 n フレームについてのこの角度データを平均したものの $\bar{\psi}_F$ を車椅子の行動決定に利用する。 $\bar{\psi}_F$ の大きさが 30 度以上になったときに、人間が左または右を向いているとし、車椅子を顔の向いている方向へ走行させる。また、 $\bar{\psi}_F$ の大きさが 30 度未満の場合はほぼ正面を向いているものとみなし、車椅子を前進させる。ただし、 θ_F の n フレーム間の平均 $\bar{\theta}_F$ が 15 度より小さいとき、つまり、顔をやや下向きにし、カメラの方向を向いたときは車椅子を停止させる。

以上の規則を Table 1 にまとめる。この規則に従って、顔の向きにより車椅子の操作を行った。

4.2 顔の向きによる車椅子の操作

2 章で述べた (1)(2) の場合と車椅子の操作を意図して顔を動かしたかを識別するのは、車椅子操作の場合はゆっくりと大きく顔を動かすだろうという仮定である。処理の中でこれにかかわるのは左右へ動かすかどうかの判定のしきい値とスムージングのフレーム数 n である。前者は、実験システムということでやや大きく 30 度に設定した。後者に対して適当な値があるかどうかシステムの有効性を決めることになる。

この n を大きくしておけば、車椅子は顔の小さな動きや一瞬の素早い動きにつられて左右に動くことはない。したがって、意図認識の点では確実になる。しかし、その分、人間の顔の動きに対する車椅子の反応が遅くなっているため、突発的に現われた障害物を回避するような早い反応は難しい。システム全体としてはこのような障害物回避は超音波センサによる自律的な行動で支援する予定であるが、やはりあまり応答が遅くは自分の意思が伝わっているかはっきりしないし、実際に思ったように動き出すまで顔をそちらに向けていなくてはならず、操作性が良くない。そこで、 n を変えて、方向転換を意図しない顔の動きへの対処の正確さと、反応の遅さに対する操作感の良否について、実際に走行実験を行って検討した。

始めに反応の遅さに対する操作感の良否の実験について述べる。実験は 6 人の被験者に n を 1 から 20 まで変化させたそれぞれの状態で車椅子に乗って室内を自由に走行してもらい、操作感の良否を 3 段階（1. 悪い, 2. 普通, 3. 良い）で判定しても

Table 2 Experimental evaluation for response time by six subjects (A-F)

Frames(<i>n</i>)	A	B	C	D	E	F	Total
1	1	2	3	3	2	3	14
3	2	2	3	3	3	2	15
5	3	3	2	3	3	3	17
6	1	3	2	2	2	2	12
7	1	3	2	2	2	2	12
8	1	3	3	2	1	2	12
9	1	2	2	1	2	1	9
10	1	2	2	1	2	2	10
12	1	1	2	1	2	2	9
14	1	1	1	1	1	2	7
16	1	1	1	1	1	2	7
18	1	1	1	1	1	1	6
20	1	1	1	1	1	1	6

らった。実験結果は、まず6人とも顔の向きの方に動く車椅子だという指示だけで自由に移動できたので、顔の認識およびそれによる操作の可能性は示されたと考えられる。操作感の良否についての結果を Table 2 に示す。表中の数値は3段階評価の点数で、Total の欄の数値は6人の被験者 (Subjects A~F) の点数の合計点である。 n が小さい方が顔の動きに素早く反応するので、評価が高くなっている。ただし、 n があまりにも小さい場合はちょっとした顔の動きにも反応してしまい評価が少し悪くなる。実験では $n = 5$ が最高点を得ている。

次に顔の無意識の動作に対する誤動作を防ぐための評価実験を行った。前回と同じように n を変化させて車椅子の挙動がどうであったかを判断する。無意識動作を想定するため、顔の動きを次の三つのレベルで考えることにした。

- (1) レベル1: ほんの一瞬のよそ見を想定したもの (動作時間 ~0.5 秒)。
- (2) レベル2: 周囲を軽く見渡す程度 (動作時間 0.5 秒~1.0 秒)。
- (3) レベル3: 周囲を確認する。書いてある文字をはっきり読めるくらい (動作時間 1.0 秒~1.5 秒)。

評価方法としては、車椅子が直進している状態で無意識動作を想定して顔を動かしても、車椅子がほぼ直進状態を保っているかどうかを検討する。車椅子が直進状態を保つことができれば可 (○), 直進状態から完全に外れてしまい不安定であるならば不可 (×) とする。一人の被験者に上記の3レベルと考えられる動作を5回ずつ行ってもらい、その際の車椅子の反応を調べた。結果を Table 3 に示す。

当然のことであるが、 n が大きくなれば、顔の無意識な動きに反応しなくなる。レベル1の動きに反応しなくなるようになるには $n = 10$ 以上、レベル2に対しては $n = 15$ 以上、レベル3に対しては $n = 20$ 以上にすることが必要である。ただし、この表では少しでも動き出したら不可 (×) としているが、実際には一瞬ある方向に動いても、その後正面を向いていれば、全体の走行としては問題にならない。したがって、 n を10から15ぐらいに設定すれば無意識に顔を動かしたものに反応して困るという問題はかなり避けられる。

以上の二つの実験結果から、方向転換を意図しない顔の動きへの対処の正確さと、反応の遅さに対する操作感の良否の両者

Table 3 Experimental evaluation for unconscious head movements

Frames (<i>n</i>)	5	10	15	20	30
Level 1	×				
	×	×			
	×	×	×		
	×				
Level 2	×	×			
	×	×	×		
	×	×			
	×	×			
Level 3	×	×	×		
	×	×			
	×	×	×		
	×	×	×	×	
	×	×	×		

を満足するために n として一つの数値を選ぶなら、10にするのがよいことが分かった。

しかし、上記の実験に参加した被験者の意見から次のようなことが分かった。反応速度に対する実験では $n = 5$ が最高点を得たが、これは車椅子を右折や左折した場合、曲がっていくのに伴い、自然に搭乗者は前を向くようになるが、この際に早く反応してくれるからだということである。車椅子を右や左に動かす場合は意図的にその方向を見るので、これに対しては反応は若干遅くてもそれほど気にならない。しかし、希望の方向に曲がっていくとほとんど無意識的に正面を見るので、その際にまだ前に顔を向けていた方向に車椅子が少しでも動く車椅子が思ったとおりに動いてくれているのか不安に感じるというのである。そこで、顔の向きの計測結果が右や左になる場合には $n = 15$ 、左右から正面に戻る計測結果のときは $n = 5$ の値を用いて動くようにするとよいのではないかとこの考えを得た。実際にこのように動くように車椅子のプログラムを変更し、前述の実験の6人の被験者に乗ってもらったところ、反応速度に対しては $n = 5$ と同じ評価点を得た。また、この設定では顔の無意識な動きに対しても反応しにくくなっているため、車椅子の評価の2項目をどちらも良好に満たすことが分かった。

最後に、実際の走行の1例として、人間が右を向いたときに車椅子が右へ、左を向いたときには車椅子が左へ移動した様子を Fig. 7 に示しておく。左の列の画像は、車椅子に乗っている人間の顔の画像で、白いウィンドウは追跡された顔の各特徴の位置を示している。右の列の画像は、車椅子の動きを表している。このときの顔の左右の動きを Fig. 8 に、顔の左右の動きの10フレーム間の平均を Fig. 9 に示す。ただし、Fig. 8, 9 では、右方向を +、左方向を - で表している。また、顔の向きを表す平面 P の法線方向の単位ベクトルの投影 F の先端を Fig. 10, 11 に示す。これらは、顔が正面を向いているときは原点に、顔が右を向いているときは左側に、左を向いているときは右側に点が集まるようになっている。

4.3 車椅子に地図情報を与えた場合の顔の向きによる操作
前節では、人間が進みたい方向を向くことにより車椅子を操作する実験について述べた。しかし、このままでは、よそみな



Fig. 7 Experimental results: face direction (left column) and wheelchair motion (right column)

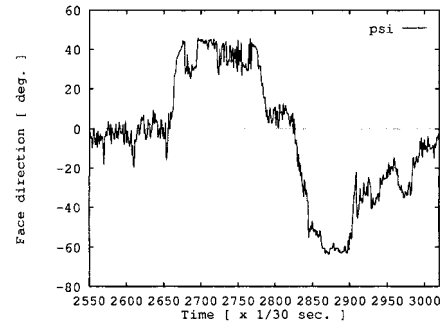


Fig. 8 Face direction ψ_F

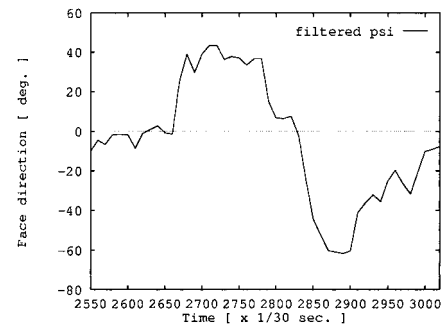


Fig. 9 Face direction smoothed by averaging ten frames $\bar{\psi}_F$

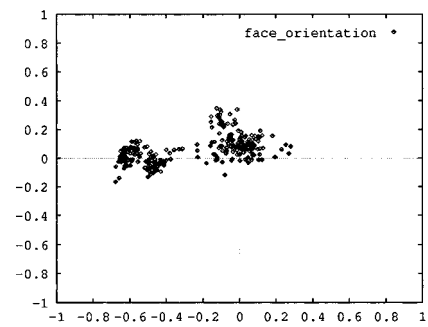


Fig. 10 Face direction (time 2557 ~ 2823)

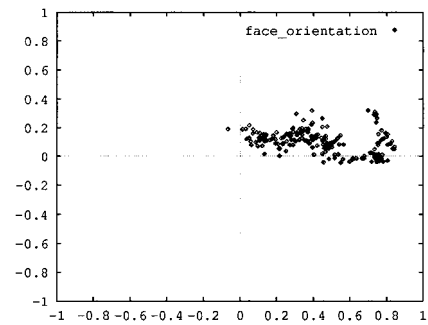


Fig. 11 Face direction (time 2824 ~ 3020)

どといった、その方向への移動を意図していない顔の動きに対してでも、車椅子がその方向へと進んでしまうおそれがある。この場合、もし車椅子に周囲環境の認識機能があれば、人間が壁や障害物の方向を向いたとしても、その方向へは進まないようにできる。今後、本実験システムに超音波センサを搭載し、周囲の環境の認識を行う予定であるが、現在開発中であるため、その代わりとして車椅子にあらかじめ地図情報を与えることにより、上述の機能の実証実験を行った。なお、この実験では、車椅子は左右の後輪の総回転数に基づき、デッドレコニングで自己の地図上での位置を認識できるようにした。

実際には、車椅子の両側に壁と長椅子が存在しており、その先は左右の分岐点になっているという地図情報を与え、顔の向きによる操作実験を行った。このとき、車椅子に乗っている人間は途中で壁に張っている掲示物の方向を見る。当然その方向には壁があるため、車椅子はその方向へは進まない。そして、分岐点に到着すると車椅子はそれを認識し、前節のように人間の顔の向きに従った走行を行う。Fig. 12 に一連の車椅子の動作の画像を示す。Fig. 12 の中段の二つより、人間が壁の掲示物を見ているときには、車椅子はその方向へ進むことなく停止していることが分かる。そして、Fig. 12 の下段の二つより、分岐点に到着してはじめて、車椅子が曲がっていることが分かる。

Fig. 13 に顔の左右の動きを、Fig. 14 に車椅子の左右の後輪の総回転数にある係数をかけたものを示す。これらを見ると、約 600 フレームから約 700 フレームまでの間、人間が右を向いていても、左右の後輪の総回転量が一定値になっている、つまり、車椅子が停止していることを示している。また、約 900 フレームから人間が再び右を向き、そのとき左の後輪の総回転量が、右の後輪の総回転量より大きくなっていることより、車椅子が右へ進んでいったことを表している。

以上より、人間が進みたい方向へ顔を向けるという意識的な動作と人間がただその方向を見ているときの動作の区別に関して、周囲環境の認識が有効な場合があることが確認された。これについては、周囲環境の認識機能を実現して、さらに検討していきたい。

5. ま と め

人間を観察することにより、その人間の非言語的行動から意図を理解し、その要求に基づき行動する知的車椅子を提案した。その実現に向けての最初のシステムとして、顔の向きを認識することにより、行きたい方向を人間が見るといった行動で操作のできる車椅子システムを実現した。提案システムでは車椅子を右左折させたい場合には意識的に曲がる方向を見てもらう必要がある。しかし、曲がりたい方向を見というのは、ヒューマンインタフェースとしては操作感覚の良い動作であると考えられる。そして、この方式で重要なのは、搭乗者は曲がっていくと正面を向いていくのが自然な動作だが、このほとんど無意識的な動作が車椅子の走行の制御に利用できることである。実際に車椅子システムを製作して走行実験を行い、意識的な左右を見る動作と無意識的な正面に戻す動作に対して車椅子の反応の仕方を変えることにより、良好に車椅子が操作できることを示した。



Fig. 12 Experimental results for navigation with the map

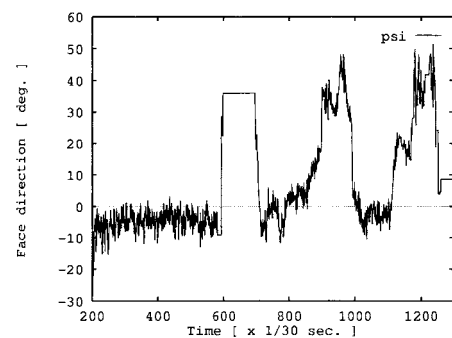


Fig. 13 Face direction in the map navigation

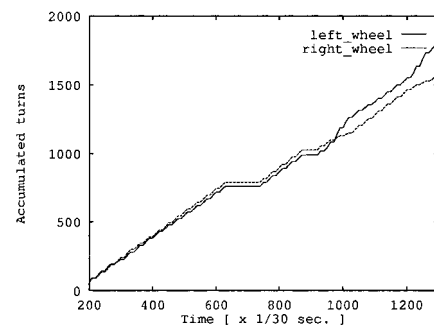


Fig. 14 Numbers of accumulated turns of the left and right wheels

今後は外界認識をもとにした支援の部分についても開発を進め、視線方向や表情の認識なども含めたより進んだ意図認識機能と合わせて、人間の思い通りに容易に動いてくれる車椅子の実現を目指していきたい。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費(09555080, 09221217), メカトロニクス技術高度化財団, 人工知能研究振興財団の補助を受けた。ここに深く感謝する。

参考文献

- [1] D.P. Miller and M.G. Slack: "Design and testing of a low-cost robotic wheelchair prototype," *Autonomous Robotics*, vol.2, pp.77-88, 1995.
- [2] R.C.Simpson and S.P. Levine: "Adaptive shared control of a smart wheelchair operated by voice control," *Proc. of 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.2, pp.622-626, 1997.
- [3] H.A. Yanco and J. Gips: "Preliminary investigation of a semi-autonomous robotic wheelchair directed through electrodes," *Proc. of Rehabilitation Engineering Society of North America 1997 Annual Conference*, pp.414-416, 1997.
- [4] A. Pentland and F. Liu: "Towards augmented control systems," *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles '95*, pp.350-355, 1995.
- [5] 大村和典, 伴野明, 小林幸雄: "単眼視画像による顔の向きを検出法の指示入力への応用", *電子情報通信学会論文誌*, vol.J72-D-II, no.9, pp.1441-1447, 1991.
- [6] 本郷仁志, 村田彰, 山本和彦: "目, 口領域の抽出による顔の向きの推定", 第2回パターン計測シンポジウム, pp.37-42, 1997.
- [7] H. Inoue, M. Inaba, T. Mori and T. Tachikawa: "Real-time robot vision system based on correlation technology," *Proc. of International Symposium on Industrial Robots*, pp.675-680, 1993.
- [8] R. Cipolla, Y. Okamoto and Y. Kuno: "Robust structure from motion using motion parallax," *Proc. of Fourth International Conference on Computer Vision*, pp.374-382, 1993.
- [9] 岡本, チボラ, 風間, 久野: "定性的運動認識を用いたヒューマンインタフェースシステム", *電子情報通信学会論文誌*, vol.J76-D-II, no.8, pp.1813-1821, 1993.
- [10] R. Cipolla: *Active Visual Inference of Surface Shape*. Springer, 1992.



足立佳久 (Yoshihisa Adachi)

1972年4月25日生。1996年、大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業。1998年、同大学大学院修士課程修了。同年、シャープ(株)入社。在学中、コンピュータビジョン、知能ロボットの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)



中西 知 (Satoru Nakanishi)

1975年7月8日生。1998年、大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業。現在、同大学大学院修士課程在学中。コンピュータビジョン、知能ロボットの研究に従事。



久野義徳 (Yoshinori Kuno)

1954年4月13日生。1977年、東京大学工学部電気工学科卒業。1982年、同大学大学院博士課程修了。同年(株)東芝入社。1987~88年、カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員。1993年4月より大阪大学工学部電子制御機械工学科助教授。コンピュータビジョンおよびそのロボットやヒューマンインタフェースへの応用に関する研究に従事。工学博士。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会, 人工知能学会, 計測自動制御学会, IEEE 各会員。(日本ロボット学会正会員)



島田伸敬 (Nobutaka Shimada)

1969年12月30日生。1992年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業。1994年同大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了。1997年同後期課程修了。博士(工学)。同年、大阪大学工学部電子制御機械工学専攻助手。コンピュータビジョンとそのヒューマンインタフェースへの応用に関する研究に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。



白井良明 (Yoshiaki Shirai)

1941年8月3日生。1964年名古屋大学工学部機械工学科卒業。1969年東京大学大学院工学系博士課程修了, 工学博士。同年, 電子技術総合研究所入所, コンピュータビジョン, ロボティクスの研究に従事。1971年~1972年, MIT AI ラボ客員研究員。1988年大阪大学工学部電子制御機械工学科教授。人工知能学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本機械学会各会員。(日本ロボット学会正会員)