

三次元フローを用いた人込みにおけるロボットの障害物回避

○ 岡田 慧 青山 拓磨 加賀美 聡 稲葉 雅幸 井上 博允

東京大学大学院工学系研究科

Moving Obstacle Avoidance in a Crowd Environment using 3D Flow

○ Kei OKADA Takuma AOYAMA Satoshi KAGAMI Masayuki INABA Hirochika INOUE
Graduate school of Engineering, University of Tokyo

Abstract :

A robot which behaves in real world, especially a robot co-exist with human requires three-dimensional perception function and action control based on three-dimensional perception.

In this paper, we describes visual function which is able to percept three-dimensional structure and motion of dynamic environment(which we call three-dimensional flow). To achieve action control considering three dimensional motion of obstacles, we apply potential field which take account of three-dimensional flow.

Finally, to illustrate the validity of the proposed method, we will show an experiment which the robot moves autonomously while several person is walking.

Keywords : Moving Obstacle Avoidance, Real-Time Vision based Robot, Three-Dimensional Flow

1 はじめに

実世界で行動するロボット、特に人間と共存するロボットでは三次元の環境を知覚する機能と、それに基づく行動生成法が欠かせない。三次元的な構造の知覚がなければ、階段昇降、くぐりぬけ等の行動を生成できず、三次元的な動きの知覚がなければ、動いている人間に抱きつく、追いかける、避ける等の行動の生成が困難である。

これまでのロボットでは、ステレオ視による距離情報や、オプティカルフローによる動き情報を用いた研究が行われてきている [1,2]。しかしこれらの手法は三次元的な構造と動き情報の一部しか利用できず、そのために、ステレオ視を行う場合は環境中の物体は静止しているという仮定や、また、フローを用いる場合は、環境中の物体の運動は、カメラの光軸に垂直方向であるという仮定をおいており、様々な運動をしている物体の知覚とそれを考慮した行動生成といった、一般的な問題に対応できていない。

そこで、本論文では障害物の形状や運動が未知の環境でも複数の障害物の三次元の運動を考慮したロボットの回避行動を実現するために、動的環境の三次元的な構造と動きを知覚することが可能な視覚処理手法（我々は三次元フローと呼ぶ）を提案し、これを用いた障害物の三次元の動きを考慮した行動生成手法として、三次元フローを考慮したポテンシャル場の考え方を提案する。

三次元フローは画像中の各点の距離と、その三次元的な動きに関する情報であり、これは、時間的に連続するステレオ画像から得られる視差情報を、フロー情報を用いて対応づけることで計算する。

三次元フロー考慮したポテンシャル場を利用すること

で、障害物の三次元の運動を考慮した行動生成をおこなう。この方法の特徴として以下が挙げられる。視覚センサへ入力から、ロボットの行動生成までに、環境の構造や動きに対する仮定を一切置かない一般的な手法である。ロボットの形態に依存せず、移動ロボットでも、マニピュレータでも利用できる。さらに、従来の三次元空間におけるロボットの行動生成手法は理想的なセンサ情報を仮定しシミュレーションを用いた研究 [3,4] が主でだが、本論文で述べる手法は実センサを用いて実環境でのロボットの行動生成が可能であることを実証している。

また、ロボットでは処理の実時間性、ロバスト性、ロボット搭載可能性が重要になる。従来の専用ハードウェアや DSP を用いたアプローチ [5,6] では装置が大きくなるためにロボットに搭載することが困難である。本論文では PC を用いたシステム構成法を採用することで、ロボット上で視覚処理が可能になった。

最後に、視覚システムを搭載した車輪型移動ロボットを用いて、複数の歩行者が存在する環境におけるロボットの自律移動を行い、本論文で提案した手法の有用性を示す。

2 三次元フローに基づくロボットの移動障害物回避

本節では、本論文で提案する動環境の構造と動きを知覚するための三次元フローと、それに基づくポテンシャル場を用いたロボットの行動生成法について説明する。

この手法により、例えば図 1 のように、障害物 A はロボットに向かってきているが、障害物 B はロボットから遠ざかっている状況を考える。障害物の動きを考慮しな

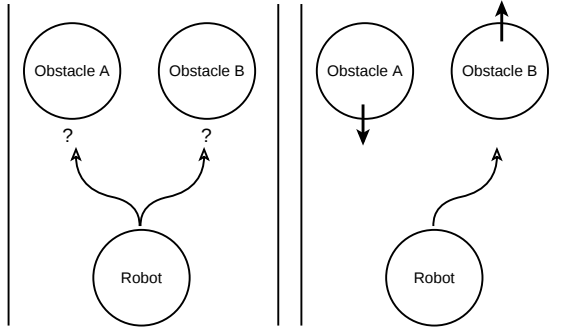


Fig. 1: left) Behavior of a robot with potential field, right) Behavior of a robot with potential field considering motion of obstacles

い場合 (図 1 左) はポテンシャル場を用いてもロボットの行動を決めることが出来ないが, 物体の動きを考慮したポテンシャル場を用いることで (図 1 右) に示すように, 障害物の動きを考慮した行動が可能になる。

2.1 三次元フローの定義

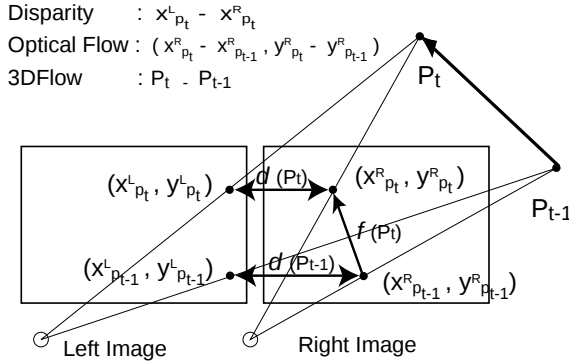


Fig. 2: A description of 3D Flow

本節では, まず, 視差およびオプティカルフローの定義, 計算方法を確認し, 次に三次元フローの定義, 計算方法を示す。

視差は外界の環境中の点 P_t とカメラの間の距離を示す。 P_t の右画像上への投影を $(x_{p_t}^R, y_{p_t}^R)$, 左画像上への投影を $(x_{p_t}^L, y_{p_t}^L)$ としたとき, 視差 $d(P_t)$ は

$$d(p) = (x_{p_t}^R - x_{p_t}^L)$$

で与えられる。これは, 右画像上の点に対応する点を左画像中から探索する問題となる。

一方, オプティカルフローは環境中の点の三次元的な動きベクトルの画像上への投影を示す。時刻 t における, 点の P_t の右画像上への投影を $(x_{p_t}^R, y_{p_t}^R)$, 時刻 $t-1$ における右画像上への投影を $(x_{p_{t-1}}^R, y_{p_{t-1}}^R)$ としたと

き, オプティカルフロー $f(P_t)$ は,

$$f(P_t) = \begin{pmatrix} x_{p_t}^R - x_{p_{t-1}}^R \\ y_{p_t}^R - y_{p_{t-1}}^R \end{pmatrix}$$

で与えられる。これは, 時刻 t の画像上の点に対応する点を時刻 $t-1$ の画像中から探索する問題となる。

これに対し三次元フローは環境中の点の位置と, 三次元的な動きベクトルを示し, ある点 P_t の時刻 t における視差,

$$d(P_t) = (x_{p_t}^R - y_{p_t}^L)$$

と, 三次元的な動きベクトル,

$$3Df(P_t) = \begin{pmatrix} x_{p_t}^R - x_{p_{t-1}}^R \\ y_{p_t}^R - y_{p_{t-1}}^R \\ d(P_t) - d(P_{t-1}) \end{pmatrix}$$

で与えられる。従って三次元フローの計算は以下のように定式化できる。

1. 画像上の点 $(x_{p_t}^R, y_{p_t}^R)$ の左画像中で対応する点 $(x_{p_t}^L, y_{p_t}^L)$ を探索し, $d(P_t)$ を得る。
2. 同じく, 点 $(x_{p_t}^R, y_{p_t}^R)$ の前の時刻の右画像中で対応する点 $(x_{p_{t-1}}^R, y_{p_{t-1}}^R)$ を探索する。
3. この点 $(x_{p_{t-1}}^R, y_{p_{t-1}}^R)$ に対応する点 $(x_{p_{t-1}}^L, y_{p_{t-1}}^L)$ を左画像中で探索し, $d(P_{t-1})$ を得る。
4. これらから, 三次元フロー $d(P_t), (x_{p_t}^R - x_{p_{t-1}}^R, y_{p_t}^R - y_{p_{t-1}}^R, d(P_t) - d(P_{t-1}))^T$ を得る。

2.2 三次元フローを考慮したポテンシャル場

2.2.1 ポテンシャル法 ポテンシャル法を用いたアプローチは障害物からの斥力と目的地への引力から人工ポテンシャル場を構成し, この上で障害物に接触しない経路を探索する。このアプローチの特色として, 障害物が移動した場合にはポテンシャル場が変化するため, 適応的な反応が可能な点, また, マニピュレータの軌道計画から, 移動ロボットの経路計画まで統一的な枠組みで考えられることが可能な点が挙げられる。

一般的なポテンシャル法は以下である。障害物からの斥力を P_O , 目標物への引力を P_G で表し, ポテンシャル場を $P = P_O + P_G$ で表す。斥力 P_O , 引力 P_G の計算方法はいくつか考えられるが, 例えば斥力 P_O を障害物とロボットの距離の逆数とし, 引力 P_G をロボットと目的地の距離の逆数とする方法などがある。

2.2.2 三次元フローを考慮したポテンシャル場 本節では, まず三次元フローを考慮せず, 距離画像からポテンシャル場を構築する方法を述べ, 次に三次元フローを考慮した方法を述べる。

視覚により距離画像 ($N \times N$ 画素, 最大視差 D) が得られるとする. 距離画像中の x, y での視差を $d(x, y)$ とする. このとき, ロボットの前方の空間を $N \times N \times D$ のボクセルで表現された空間を考える. ボクセル x, y, d での斥力は,

$$P_O = \sum \frac{1}{1 + \text{dist}(x, y, d(x, y))}$$

で表現される. ここで $\text{dist}(x, y, d)$ は, カメラと障害物との距離を示し

$$\text{dist}(x, y, d) = \sqrt{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma d^2}$$

である.

一方, 三次元フローを考慮したポテンシャル法を構成する方法は, 距離画像中の x, y での視差を $d(x, y)$, 三次元的な動きベクトル $(mx, my, md)^T$ とすると, ボクセル x, y, d での斥力は,

$$P_O = \sum \frac{1}{1 + \text{dist}(x + mx, y + my, d(x, y) + md)}$$

で表現される.

2.2.3 ポテンシャル場に基づく行動生成 ポテンシャル場に基づく行動生成は, ロボットの現在位置でのポテンシャルを微分し, その時刻におけるポテンシャルの勾配を求め, その方向に移動する. また, 勾配の強度からロボットの移動速度を決定する.

3 ロボット搭載用三次元フロー生成システム

ロボットで三次元フローを利用するためには, 実時間性, ロバスト性, ロボット搭載可能性を有したシステムを構築する必要がある. 本節では, PC を用いたソフトウェアによるアプローチによりこれを達成する方法を示す.

3.1 再帰相関演算と MMX 命令を用いた実時間処理

三次元フローを高速に生成するためには, 視差画像とオプティカルフローを高速に生成すればよい. 視差画像生成では, 再帰相関演算法 [7] によりアルゴリズムの冗長性を排除し, 計算量を削減することが知られている. 我々はこれを二次元に拡張することでオプティカルフローの生成に適用した [8].

次に, 汎用 CPU でデータ量の大きい計算を行う際にはキャッシュに対する最適化が重要となってくる. そこで計算する際に, ローカルに演算途中に使用する変数を計算し, メモリもローカルにデータを保持する量を確保することとする.

これにより例えば (一次元) 再帰相関演算では単純にインプリメントすると約 3.2MB の必要になる配列サイズが約 153KB まで低減することができ, Pentium 系プロセッサの 2 次キャッシュに入りきる.

最後に, Intel の Pentium(R) プロセッサに搭載されたマルチメディアインストラクションセットである MMX 命令を利用することで, 再帰相関演算の高速化を図る.

MMX 命令は Intel の PentiumMMX プロセッサ以降に搭載されたマルチメディア命令で, 一クロックで 64bit 長の MMX レジスタ上 (あるいはメモリ上) におかれたデータ配列の和, 積, 積和, 論理演算等を行う. ただし割り算命令をもっていないことと, 積は 16bit $\times$ 16bit までしかできないといった制約が存在する.

3.2 一貫性評価法による信頼度評価と実時間実装

また, 三次元フローの信頼性を評価し, 誤対応やオクリュージョン領域を検出するために, 画像処理の分野で提案されている一貫性評価法 [9, 10] を時空間に拡張することにより三次元フローの矛盾性を評価し, 誤対応やオクリュージョン領域を検出する.

これは一つの画像の点に対応する反対側の画像上の点からの対応点が, 最初の点に一致する場合のみ, その対応が信頼できるとするものである. この方法により, 対応点がとれない場所がはっきり区別出来るようになる.

三次元フローを計算するためには, 二枚の距離画像と一枚のオプティカルフロー画像が必要であるが, オプティカルフロー画像を両眼で計算することにより, 前述の一貫性評価法を時空間に拡張した誤対応領域の検出が可能となる.

また, 一貫性評価法は再帰相関演算のループ内に組み込むことでメモリ使用量, 計算時間を増やすことなく視差画像を高速に計算できるようになる.

例えば距離画像においてまず左右の画像の信頼度の計算を行う際には, 対応点探索のための相関度の計算を右から左, 左から右の双方で行う必要はなく, 相関演算は一度行うのみで, 対応点探索だけを両側で行えばよい.

3.3 実時間性の評価

本節の実験は PentiumIII-500MHz (外部バス 100MHz) を用いて linux 2.2.13 上で行った.

画像取り込み装置は Bt848 という画像取り込み IC を用いたキャプチャーカードを用いた. このハードウェアは PCI バスに接続され, リアルタイムで画像をメモリに DMA 転送する機能を持ち, 実際に画像を取り込みながら計測を行った. 計算時間を表 1 に示す.

4 実環境での移動障害物回避実験

複数の歩行者が存在する環境においてロボットの自律移動を行った. 以下に実験に用いたロボットシステム, 及び実験内容を示す.

4.1 PC を搭載した視覚移動ロボットシステム

Table 1: Calculation Time : a) Correlation, b) Recursive Correlation Method, c) Cache Optimal Correlation, d) Adopt MMX Instructions

	PentiumIII-500MHz			
	Disparity Map Generation		Flow Generation	
	WithCC	WithoutCC	WithCC	WithoutCC
a)	5,332.7	2,594.5	1,928.7	903.5
b)	66.5	51.2	78.3	63.6
c)	41.9	34.0	40.9	31.5
d)	32.6	23.6	25.4	18.6

(msec)

($N=128, W=15, D=20$ in Disparity Map Generation and,
 $N=64, W=16, D=8$ in Optical Flow Generation)

CC:Consistency Checking



Fig. 3: Vision-based mobile robot

市販の車輪型ロボット (Nomadic 社の ScoutII), ステレオカメラ, PC による視覚処理・ロボットシステムを組み合わせ, 図 3 に示すような視覚移動ロボットを構築した.

Nomadic 社の ScoutII は円形の二輪を有する車輪型ロボットで電源と制御用 DSP を搭載し, 完全な自立が可能なシステムである. 仕様は以下である. 直径 41[cm], 高さ 35[cm], 重量 23[kg] であり, 最高速度 1.0[m/sec] で移動でき, 16 個の超音波センサと, 6 個のバンパー上の接触センサを持つ (但し, これらのセンサは本論文における実験では利用していない). 外部のコンピュータと ScoutII はシリアル通信を介しての接続することが可能で, 外部のコンピュータからロボットの行動指令を与えることができる. 通信処理装置として Motorola 68332 を, 制御用の DSP として TMS320C14 を搭載し, 制御周期は 2[KHz] である.

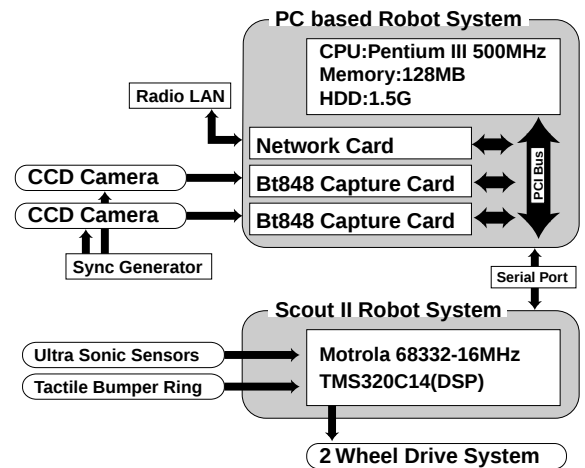


Fig. 4: Hardware components of vision-based mobile robot system

また, 視覚処理を実現するために PC を用いた視覚処理・ロボットシステムを構築し ScoutII のボディ内に搭載した. CPU は Intel PentiumIII 500[Mhz] を搭載し, メモリ 128 [MB], ハードディスク 1.5[GB] であり, 無線 LAN を用いて研究室内の LAN に接続されている. OS は Linux を採用し, Bt848 を搭載した画像キャプチャ装置を 2 枚利用し, それぞれ右カメラ, 左カメラを接続した. また, 左右のカメラには同期信号生成装置から外部同期信号を与えた.

PC 上で画像処理に基づき決定されたロボットの行動は, シリアル通信を介して指令する.

4.2 移動障害物回避実験

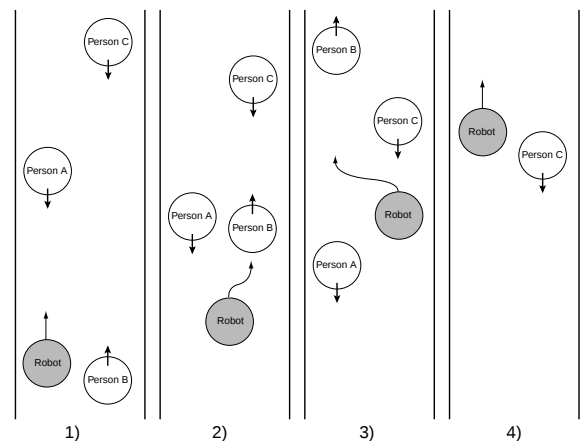


Fig. 5: A situation of an experiment

三次元フローとそれを考慮したポテンシャル場を用いることで, 障害物の形状や運動が未知の環境において, 複数の障害物の運動を考慮した行動を実現できることを示すために実験を行った. 実験では三人の歩行者が存在

する環境で、ロボットが自律的に障害物を回避した。

視覚センサにより獲得した画像を 48×48 画素に縮小し、これに LoG フィルタ処理を施し、視差画像、フロー画像、三次元フローの生成を行った。視差画像生成のウィンドウサイズは 11, 探索範囲 d の値域は $0 \leq d \leq 15$ 。フロー生成のウィンドウサイズは 13, 探索範囲 i, j の値域は $-6 \leq d \leq 6$ である。生成された視差情報、フロー情報、三次元フロー情報にはローパスフィルタ処理を施している。三次元フローからポテンシャル場を計算し、ロボットへ動作指令を行う。また、本実験の場合ロボットの行動生成に必要な情報は横 1 ラインの三次元フロー情報であるとし、ポテンシャル場の生成はこの情報だけを用いている。このときの各処理に掛かる時間を表 2 に示す。

Table 2: Calculation time of each functions on PentiumIII-500MHz

Function	Time	Notes
LoG	2.61	for 2 images
stereo	4.41	search area is 0 to +16
low-pass	3.32	
flow	43.30	search area is -6 to +5
low-pass	5.81	
3Dflow	0.59	
potential	0.60	for 1 line(48 points)

(unit:msec): The size of the image is 48×48 pixel.

実験では廊下で 3 人の歩行者が存在する環境で行った。実験時の各人の動きと、ロボットの行動を示した図を図 5 に示す。また、実験の様子を図 7 に示す。また、ロボットが歩行者を回避していること、また、2) の時刻では、ロボットは歩行者の動きを考慮した回避行動を取っていることがわかる。またこの時の各視覚処理結果を図 6 に示す。上段は図 5 2) の時点、下段は図 5 3) の時点である。

5 おわりに

本論文では、動環境の構造と動きを知覚する三次元フローとそれを考慮したポテンシャル場を用いて行動生成法を提案した。さらに、ロボットにおいて重要になる処理の実時間性、ロバスト性、ロボット搭載可能性を満たすようなシステム構成法として、PC 上のソフトウェアによるアプローチを示し、これにより、障害物の形状や運動が未知の環境において、複数の障害物の運動を考慮した行動を実現できることを実環境での実験により実証した。

本論文で示したロボットの知覚・行動生成法の特徴として、環境の構造や障害物の形状、運動に対する知識を

仮定しない一般的な手法であること、ポテンシャル法の考え方をを用いているため、本論文で示したような移動ロボットの障害物回避行動だけではなく、マニピュレータの経路計画などにも適応可能であることが挙げられる。

今後はヒューマノイドロボットのセンサーベースな行動生成法の研究が重要になると考えられる。本論文で示した手法は、視覚に基づいた移動とマニピュレーションに適用できると考えている。

参考文献

- 1) David Beymer and Kurt Konolige. Real-Time Tracking of Multiple People Using Continuous Detection. In *Proc. of Int. Conf. on Computer Vision*, 1999.
- 2) S Yamamoto, Y. Mae, Y. Shirai, and J. Miura. Real-time multiple object tracking based on optical flows. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2328–2333, 1995.
- 3) 坪内孝司, 浪花智英, 有本卓. 平面を移動する複数の移動障害物とその速度を考慮した移動ロボットのプランニングとナビゲーション. 日本ロボット学会会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1029–1037, 1994.
- 4) 北村喜文, 田中貴秋, 岸野文郎, 谷内田正彦. Octree とポテンシャル場を用いた三次元環境での経路探索. 日本ロボット学会会誌, Vol. 14, No. 8, pp. 1186–1193, 1996.
- 5) 内山隆, 沢崎直之, 青木孝, 森田俊彦, 稲本康, 佐藤雅彦, 稲葉雅幸, 井上博允. ビデオレートトラッキングビジョンの実用化. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 345–346, 1994.
- 6) 佐々木繁, 塩原守人. 動画像処理プロセッサ ISHTAR によるリアルタイム・オブティカル・フロー抽出. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 27–30, 1995.
- 7) O. Faugeras, B. Hots, H. Mathieu, T. Viéville, Z. Zhang, P. Fua, E. Thérion, L. Moll, G. Berry, J. Vuillemin, P. Bertin, and C. Proy. Real Time Correlation-Based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications. Technical Report N°2013, INRIA, 1993.
- 8) 岡田慧, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允. 再帰相関法とマルチメディア命令による高速オブティカルフロー計算法. 情報処理学会 第 115 回 CVIM 研究会予稿, pp. 127–132, Mar. 1999.
- 9) R. Bolles and J. Woodfill. Spatiotemporal Consistency Checking of Passive Range Data. In T. Kanade and R. Paul, editors, *Robotics Research: The Sixth International Symposium*, pp. 165–183. International Foundation for Robotics Research, 1993.
- 10) P. Fua. A Parallel Stereo Algorithm that Produces Dense Depth Maps And Preserves Images Features. In *Machine Vision and Applications*, pp. 35–49, 1991.

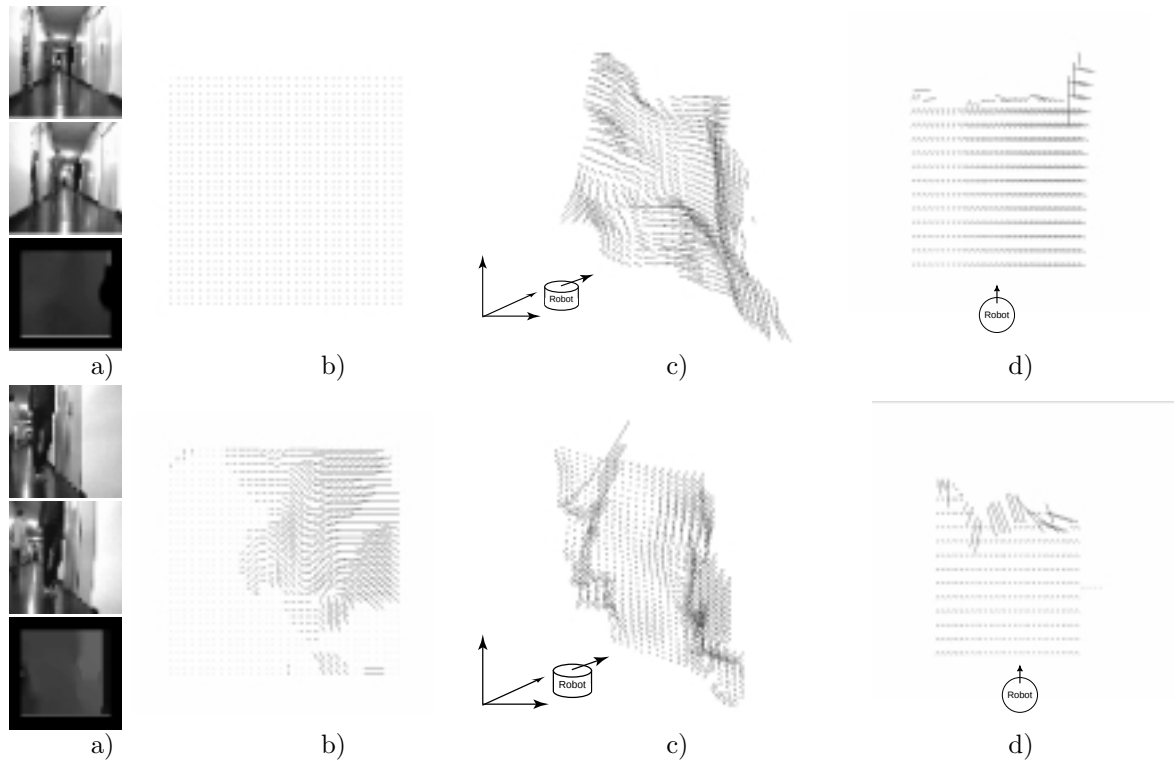


Fig. 6: Results of visual processing while moving obstacle avoidance. Top is time 2), and bottom is time 3) in Fig5. a) input image and disparity image, b)flow image, c) 3Dflow image, d)Potential feild considering 3DFlow image.



Fig. 7: An experiment of moving obstacle avoidance