

I-40 自律行動型ヒューマノイド HRP-2P 用視覚システムの開発

Development of vision system for HRP-2P humanoid to act autonomously

河井 良浩† 深瀬 勇太郎‡ 池野 良平* 石山 豊* 富田 文明†
Yoshihiro Kawai Yutaro Fukase Ryohei Ikeno Yutaka Ishiyama Fumiaki Tomita

1. まえがき

経済産業省の人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト[1]で開発したヒューマノイド HRP-2P の視覚機能について述べる。HRP-2P は、建設現場などの不整地において、人間と協調してパネルを運搬・据え付けなどができるヒューマノイドとして開発され、ユーザが簡単な指示を与えるだけで、未知環境の移動や各種作業を自律的に行う必要がある。これらの実現には 3 次元空間を正確に計測・認識できる視覚機能が必要不可欠である。本論文では、HRP-2P の視覚システムのハードウェア、及び、3 次元視覚情報処理ソフトウェアを紹介し、ROBODEX2002 で公表したテーブルの認識結果を示す。

2. HRP-2P 用ステレオカメラシステム

ヒューマノイド HRP-2P(図 1(a))の首はパン・チルト機能が備わっており、視覚センサとして、図 1(b)に示すように 3 眼ステレオカメラシステムを備えている。頭部搭載部分の重量制限、歩行時の振動に対するカメラの相対的な位置関係が変化しないなどの耐久性、及び、広い視野を精度良く得るために、絞り調整可能な C マウントの広角レンズ(焦点距離 8mm)の使用など様々な要因を考慮している。左右のカメラ間距離は約 120mm で、直角二等辺三角形になるよう中央上部に 3 眼目のカメラを設置している。カメラは、小型軽量の白黒ボードカメラを採用し、同期信号発生器による同期を行っている。レンズとして広角レンズを用いることで、ズーム機能がなくても手元から遠方までを 1 度に計測できる。また、絞り調整は手動であるが、シャッター速度は制御可能であり、照明環境の変化に自動対応できる。2 眼ではなく、3 眼としたのは、マルチベースラインにすることで、エピポーラ線と平行な部分の対応の曖昧性を軽減、及び、誤対応除去を行うためである。

3. 視覚機能

産総研では、多分野・多目的に利用できる 3 次元視覚システムとして VVV システムを開発している[2]。VVV は距離計測、形状計測、物体認識、運動追跡などの処理を基本モジュールの組み合わせで、高精度に実行できるシステムである。視覚機能を中心としたシステム構成図を図 2 に示す。HRP-2P が高度な自律行動を行うために必要とされる視覚機能のうち、3 次元計測の高精度化において不足していた、歪み補正機能、平面拘束による視差修正機能、及び、最適ベースライン選択機能を新たに追加した。基本機能モジュールの組み合わせにより、対象物の 3 次元位置・姿勢を正確に認識したり、歩行路の状態把握などが可能である。

本章では HRP-2P に実装した視覚機能のうち、前述の今回強化した 3 機能について詳しく述べる。

3.1 歪み補正機能

3.1.1 シールドの歪み補正

システムのデザインの都合上、HRP-2P では図 1(a)のようにカメラシステムの前にシールドを設置しており、シールドの影響で歪んだ画像しか得ることができない。シールドの形状、カメラとの位置関係を簡単にモデル化することができない場合が多く、そのような場合でも、歪みがある画像と歪みがない画像対応関係から変換テーブルを作成し、歪みを補正する一般的な方法を確認した。

キャリブレーションパターンとして、図 3(a)のような水玉が格子状に並んだ平面パターンを用いる。まず、画像上での各水玉の中心位置を計算する。ただし、歪みがある場合とない場合の対応関係を求めるため、中心付近の他と比べて少し大きな水玉を面積比から選別し、基準点とすることで、歪みのある画像とない画像間での対応関係を求める。次に画像と同じサイズの 2 次元テーブルを用意し、格子点の対応関係から補間することで、画像の解像度と同じサイズの変換テーブルを作成する。まず、歪みのない画像のある格子点 $P_0(X_0, Y_0)$ とその近傍の 3 点で定義される 4 角形を考える。各格子点は同一平面上に等間隔で存在する点のため、4 点で囲まれた領域に存在する点 $P(X, Y)$ はアフィン変換行列 A を用い、 $(X-X_0, Y-Y_0, 1)^T = A(m, n, 1)^T$ ($0 \leq m, n \leq 1$) と表すことができる。歪みのある画像から (m, n) で表される同じ点に変換される点 $P'(X', Y')$ も同様に、 $(X'-X'_0, Y'-Y'_0, 1)^T = A'(m, n, 1)^T$ と表すことができるので、点 P から P' への変換は、 $(X', Y', 1)^T = AA^{-1}(X-X_0, Y-Y_0, 1)^T + (X_0, Y_0, 1)^T$ と表現できる。この変換により格子点内に存在する点は変換可能である。格子点外の点の変換に関しては、対象点に一番近い格子のパラメータを用いて同様に行う。

3.1.2 レンズの歪み補正機能

レンズの歪み補正は 3 次元復元の高精度化において不可欠である。レンズの収差には、歪曲収差、色収差、球面収差などがあるが、他の収差に比べ、幾何学的に影響が一番大きい歪曲収差の補正のみを行う。

歪曲収差の補正には、シールドの歪み補正と同じパターンを用いる。格子点の 3 次元空間中における位置 P は、平面上の平行でない 2 ベクトル u, v と、原点 w を定義すれば、 $P=iu+jv+w$ で表現できる (i, j は整数)。画像の中心部においては、レンズの歪みが少ないとされているので、中心部付近の格子点の座標に対して、これらのパラメータを求め、次にすべての格子点に対して、観測点と予測点の対応を求める。観測点 (X', Y') と予測点 (X, Y) の関係は、光軸と撮像面の交点を (X_0, Y_0) とすると、 $X'=X+(X-X_0)(k_1r^2+k_2r^4)$ 、 $Y'=Y+(Y-Y_0)(k_1r^2+k_2r^4)$ 、 $r^2=(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2$ というモデルで表すことができる。実際はより高次の項までであるが、実用上は k_2 までで十分である。観測点と予測点の対応関係からパラメータ

† 産業技術総合研究所, AIST

‡ 清水建設, Shimizu Co.

* スタンレー電気, Stanley Electric Co.

を最小自乗法を用いて計算する。また、中心点は、画像の中心付近で $\sum^2(k_1+k_2)^2$ が最小となるように定める。

図 3(a)のシールド越しに得られた画像に補正を施した結果が (b)であり、シールドによる位置ずれ、画像の縁に見られた歪曲収差を約 0.2pixel 以内に収めることができた。

3.2 平面拘束による視差修正機能

3次元復元に関しては、基本はセグメントベースステレオ[3]を基本とし、物体の境界線部分の3次元構造の復元を行う。HRP-2Pでは、顔部分の形状や大きさの制限から、計測距離に対して基線長が相対的に短くならざるをえない。そのため、画像上におけるデジタル誤差や雑音などが3次元の復元精度に大きく影響し、特に遠方物体になるほど十分な精度を得られない。そこで、セグメント間の連結性に基づく平面拘束による視差の補正機能を追加した。

ステレオ対応を求める際、セグメントの連結性を使用しているため、連結するセグメントの組み合わせで求まる平面に点列が存在する場合は、その平面上に投影することで、法線方向の誤差を軽減できる。対象セグメントと連結セグメントが平面上に存在するかどうかは、平面拘束定理「標準カメラモデルにおいて、平面上の任意の図形の一方のカメラ画像上の投影像と、他方のカメラの画像上の投影像とはアフィン変換可能である。」で調べることができ、対応点の補正が可能となる。また、各セグメントに単純に直線を当てはめる場合に生じるねじれ問題も解決できる。

3.3 最適ベースライン選択機能

多眼のステレオカメラシステムで、オクルージョンや、エピポーラ線に対して平行なセグメントで復元できない部分は、他のカメラとの組み合わせで補完することができる。しかしながら、どの組み合わせでも復元できる部分に対しては、重み付け平均などで統合する手法もあるが[4]、基線長が特に短く、等長でないシステムでは、基線長が短い方の組み合わせによる復元精度はかなり悪くなるため、最適な組み合わせによる復元のみを使用した方が良い。そこで、同一セグメントに対し、異なるカメラ間で共に対応が求まった場合、図4に示すようにセグメントの接線方向、及び対象までの距離に基づく画像面上での対応位置の不確かさの評価値を計算し、この値が小さい方を最適な対応関係と

する。つまり、標準カメラモデル座標系において、対応点の接線方向がエピポーラ線となす角を θ とした場合、対応点のX方向の誤差を $\cos(\theta)$ とすると、3次元空間における対応点は四角形 A_p 内に存在することになる。この面積を評価値とし、最小となる組み合わせの対応結果を使用する。

4. テーブル認識

ROBODEX2002において、HRP-2Pを利用して、テーブルの認識、搬送デモを行った。テーブルの認識においては、その幾何モデルとのマッチングからその位置・姿勢を認識し[5]、把持位置を算出して、ロボット側に指令を与えた。図4(a)はHRP-2Pがテーブルの前までアプローチし、前方右端部分の観測を行っている場面で、その際に得られた画像が(b)である。これらの画像を先述の機能を使用して、テーブルの位置・姿勢を検出した結果が(c),(d)で、原画像、及び復元結果にテーブルのモデルをスーパーインポーズしたものである。この結果に基づく把持位置の誤差精度は約2mm以下であり、安定して把持することができた。

5. まとめ

本論文では、人間と協調して作業ができるヒューマノイド HRP-2P の 3次元視覚システムについて述べた。様々な照明下でも安定して使えるよう、輝度調整機能を有した3眼のステレオカメラシステムを開発した。また、自律行動を安定して行えるように、VVVシステムに、カメラ前に設置されるシールドの影響による画像歪みと、広角の視野を得るために用いた焦点距離の短いレンズによる画像歪みの補正機能、平面拘束による視差修正機能、及び、最適ベースライン選択機能を追加し、より高精度な3次元構造復元、物体認識などができるようになり、実機を通じてその有効性を証明した。

参考文献

[1] 井上, 比留川: 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, 19, 1, pp.2-7 (2001).
 [2] 富田: 高機能3次元視覚システム VVV, 情処学誌, 42, 4, pp.370-375 (2001).
 [3] 河井, 植芝, 石山, 角, 富田: セグメントベースステレオにおける連結性に基づく対応評価, 情処学論, 40, 8, pp. 3219-3229 (1999).
 [4] 渡辺, 大田, 池田: 3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善, 情処学論, 27, 11, pp.1086-1094 (1986).
 [5] 角, 富田: ステレオビジョンによる3次元物体の認識, 信学論, J80-D-II, 5, pp.1105-1112 (1997).

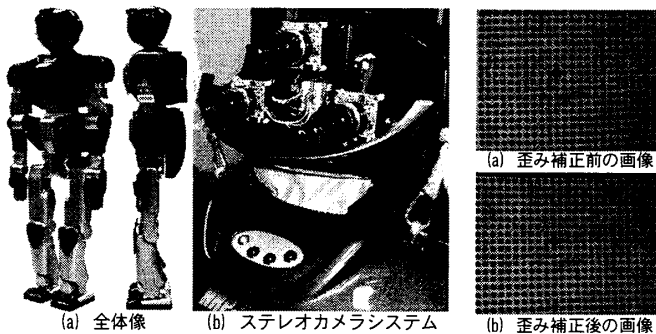


図1 HRP-2P

図3 歪み補正

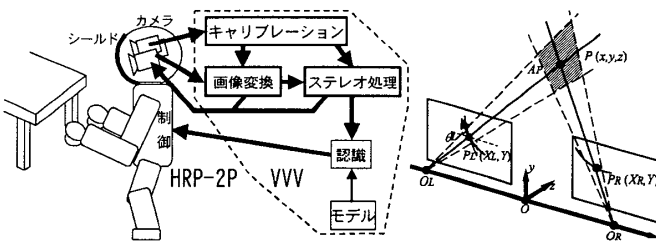
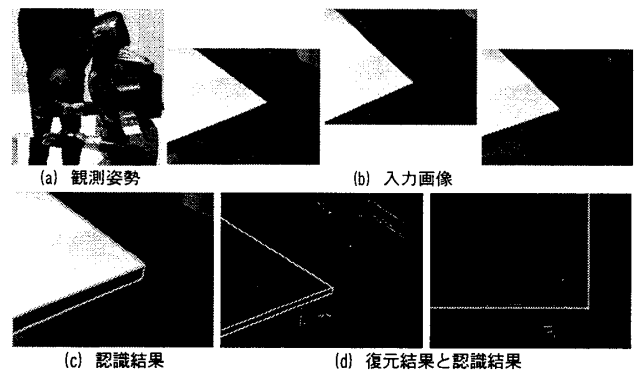


図2 システム構成

図4 誤差評価



(c) 認識結果

(d) 復元結果と認識結果

図5 テーブル認識