視覚認識行動自律型ロボットを用いた 高校生向け技術教育プログラムの実践*

森 下 武 志^{*1}, 藪 田 哲 郎^{*2}

Practice of the Technical Education Program for High School Students using a Autonomous Robot with Small Stereo Vision System

Takeshi MORISHITA^{*3} and Tetsuro YABUTA

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

This paper shows a technical education program for high school students, which consists of image information processing, stereo vision technology and control experiments of a mobile robot with the stereo vision system. Education results show that this technical education program can give excellent effect to obtain both hardware and software technology and also to obtain control experiences of actual robots. In addition, this program has the possibility to give the high school students an interesting experience of both constructing a robot and its programming, that is certified by questionnaires of the students after the program. Finally, these education results indicate that this education program is an effective education system for high school students to obtain system technology including software and hardware technology.

Key Words: Technical Education Program, Small Stereo Vision, Autonomous Robot

1. は じ め に

科学技術基本法に基づき科学技術基本計画が閣議決定され、これを受けて現在文部科学省は、科学技術創造立国の実現に向けた様々な取組みを施策している。日本が研究開発力や国際競争力を維持・向上させるための人材育成なども目標の一つであり、この実現に向けた政策として、科学技術・学術関係人材の養成・確保、科学技術・理科大好きプラン、先進的科学技術・理科教育用デジタル教材の開発など、様々なプランが実施されている。初等中等教育の身近な例では、科学技術・理科大好きプランの一環で、スーパーサイエンスハイスクールやサイエンスパートナーシッププログラム、目指せスペシャリスト等の様々なプログラムが、技術革新や産業競争力を担う将来有為な科学技術系人材育成を目指した、児童生徒と科学技術との教育的動機付けや科学技術の基礎教育に生かされている⁽¹⁾。

さらに高等学校学習指導要領による工業の教育目標

を見ると、「工業の各分野に関する基礎的・基本的な知識と技術を習得させ、現代社会における工業の意義や役割を理解させるとともに、環境に配慮しつつ、工業技術の諸問題を主体的、合理的に解決し、社会の発展を図る創造的な能力と実践的な態度を育てる」となっており、基礎技術を実験や実習によって体験させ、技術への興味感心を高める教育が成されている⁽²⁾。

これらの理念を踏まえて、本研究の対象とした神奈川県立神奈川総合産業高等学校は、平成17年度新設したばかりの高校であるが、前身が工業高校であるため、旋盤やフライス盤等の汎用工作機械から、マイコン技術に関わるハードやソフト技術等を学習できる環境が整っている。対象となってもらったのは、技術に対して課外活動の部活動でも積極的に活動している生徒達である。これらの生徒達は要素技術の教育に留まらず、メカトロニクス、ロボットシステムの研究開発から製作までを通して、総合的な技術教育、ロボット製作を行いながら様々な大会に参加し、多数の成果を残した実績のある技術と知識をもった技術者のタマゴである。

2. 本教育プログラムの特徴と研究目的

2・1 教育プログラムの特徴 本研究は、両眼の

* 原稿受付 2006年4月10日。

^{*1} 正員、横浜国立大学大学院工学府(〒240-8501 横浜市内土ヶ谷区常盤台79-5)。

^{*2} 正員、横浜国立大学大学院工学研究院。

E-mail: takeshi-morishita@pen-kanagawa.ed.jp

視覚センサモジュールを搭載した自律型の視覚ロボットを用いた画像情報処理から画像認識、およびその適用実験までを行う教育プログラムの研究(教育プログラム)に関するものである⁽³⁾。本教育プログラムの特徴は、PC内の画像処理技術の学習だけで終わることなく、(1)制御対象となる車体の製作(図1)、(2)PCによるステレオ画像情報処理演習、(3)画像情報に基づく制御プログラミングやシステム化の基礎学習、(4)画像から特徴抽出や距離認識を行う自律型視覚ロボット動作演習など、総合的な技術を体験できる教材開発と、これまで教育現場の実習や演習で行われなかった技術教育領域を開拓した教育プログラムの展開である。

図1に本教育プログラムの教材として、定められた時間内で高校生が製作したロボットを紹介する。

2.2 研究目的 本論文では小型ステレオビジョンモジュール搭載の、簡素な小型視覚認識自律行動ロボットを活用した教育プログラムを展開した。この教材を用いた教育プログラムの研究目的は、以下の通りである。(1)これまでの教材と異なる新しい技術領域の教材開発。(2)本教材の対象となる生徒の技術水準や意識の把握と、これに対応する教材・カリキュラムの提示。(3)本教材の演習項目、演習内容、準備に関わるコスト等、授業展開における具体的な教育内容や教育活動の提案および例示。(4)本教材に対する生徒の反応や興味・関心の持ち方や意識調査。本論文では、この研究目的の観点から両眼視覚自律ロボット教材の有用性や有意性を示す。

3. 受講者分析と教育目標

3.1 事前調査 すべての教育カリキュラムを指導する上で指導教員が常に配慮しているものが、教材内容と受講する生徒の学力水準との関係である。これ

Fig.1 Small autonomous robot with stereo vision system made by high school students

は技術教育においても同様である。そこで、今回この教育プログラムを受講する生徒達の技術的水準の把握、ロボットや視覚センサに対する意識を知るために、表1のようなアンケートを受講者10名に実施し、「はい」、「いいえ」の二者択一で答えてもらった結果が図2である。ほぼ全員がほとんどの質問項目について、体験または経験していることが確認できた。これは受講した生徒が1年以上の技術教育を受け、さらに部活動でメカトロニクス教育を受けている生徒達を対象としたために、このような結果が得られたと判断できる。特に、技能的な各種道具を利用する質問項目においては、高い回答率となっているが、一方で、自ら調査・検討し設計する内容については、まだ十分に技術が養われていないことが確認できた。しかし、総合的に判断すると本教育プログラムを受講した生徒は、

Table 1 Technical level questionnaire for students before program (answer is “Yes” or “No”)

Section	Question
Mechanism/Hardware	1 Can you use a saw well?
	2 Can you cut sheet metal by shirring machine?
	3 Can you file well?
	4 Can you use slide calipers and a height gage?
	5 Can you use a drilling machine?
	6 Have you used a lathe?
	7 Have you used a milling machine?
	8 Can you understand a machine design?
	9 Can you draw a machine design?
	10 Can you understand a data sheet?
	11 Can you look for a data sheet by yourself?
	12 Have you made electronic circuit?
	13 Have you soldered?
	14 Have you used cutting pliers and a nipper?
	15 Can you use an electronic millimeter?
	16 Have you used an oscilloscope?
	17 Can you understand a circuit schematic?
	18 Can you draw a circuit schematic?
	19 Do you know a polar semiconductor?
	20 Have you used a sensor?
	21 Have you used a microcomputer?
	22 Can you select parts required for an electronic circuit?
	23 Have you made an electrical system by using semiconductor module?
Software	1 Have you used C language?
	2 Have you used both input and output function of data in a microcomputer?
	3 Can you use condition branch of “IF” sentence?
	4 Can you use a repetition of a “For” sentence?
	5 Have you use interruption process?
	6 Do you know how to use a function?
	7 Can you perform of LED control?
	8 Have you used a Motor Driver IC?
	9 Can you write a program in a microcomputer?
	10 Have you read a book about a microcomputer?
Conscious	1 Have you want to use a vision sensor?
	2 Are you interested in a robot?

高校生において技術水準の高い被験者であると考えられる。

なお、3項目めの意識調査の結果では、いままで視覚センサを使いたいと思ったことがある生徒は一人もおらず(0%)、これはこれまでの技術教育で、視覚センサの存在すら教育されていない技術分野であることの裏付けであり、現在の技術教育において、視覚技術教育が非常に遅れている現状が明らかとなった。しかしながら、受講生徒はロボットに興味をもっている生徒が全員(100%)であることから、この分野に対する興味・関心の高い生徒が受講していると解釈できる。

3.2 教育目標 この結果を踏まえながら教育目標やカリキュラムを策定した。まず、教育目標である。高等学校の技術教育における教育課程では、工業技術基礎、情報技術基礎、実習、製図、課題研究などの実験や実習によって、体験教育の中から知識と技術を習得させる実践形の教育が大きな柱となっている。この趣旨に沿った技術教育における本論文の教育プログラムの教育目標を、「視覚技術の基礎的な技術を実験・実習による学習を通して、①専門的な知識と技術の深化・総合化を図るとともに、②問題解決の能力や自発的な学習態度を育て、③基礎的なメカ・ハード・ソフトの各技術分野と視覚技術との関わりを理解しな

がら、技術への興味・関心を高め、メカトロニクスに対する視野を広める」と設定した。

4. 実践的視覚認識自律型ロボットの教材化

4.1 小型ステレオビジョンセンサワンボードモジュール 図3は著者らが開発し⁽⁴⁾⁽⁵⁾、本教材で用いた小型ステレオビジョンセンサワンボードモジュール(SVOセンサモジュール)である。このモジュールはCMOSイメージセンサを2台搭載し、ステレオペア像の入力から特徴抽出や距離計測演算など基礎的な画像情報処理を施し、 x, y, z の三次元の座標を算出することができる。その演算結果が汎用的な出力ポートから引き出せるセンサデバイスとして機能するので、小型ロボットへのアタッチメントセンサデバイスとして、赤外線センサや温度湿度センサなどと同様に、簡素なロボットシステムでも容易な実装を可能としたモジュールである^{(6)~(16)}。このモジュールにより、初期段階の技術教育領域のロボットに画像認識技術の適用が実現し、本論文が示す演習用教材の展開も可能となった。

4.2 教材用ロボット 表2に本教材のロボット仕様例を、図4に教材として用いた代表的な部品の具体例を示す。製作体験を主とする教育目標の教材ならば、製作に重みを置いた演習内容になるが、本教育目標は、メカ製作からハード・ソフトまでを網羅する教

Fig.2 Questionnaire answer of Table 1 (circle number indicates the questionnaire number. Radius of the circle indicates the rate of “Yes” answer)

Fig.3 Small stereo vision sensor module

Fig.4 Main parts of education robot system

育プログラムである。従って、メカやハードウェアの製作に費やす時間配分は、カリキュラム全体のおよそ1/3程度とし、演習時間内完成を想定したロボットの構造や部品を選定した。また、これに見合う演習内容や作業量にも留意しながら、メカ部分の作業時間の負担を軽減する部品構成で本教材の開発を行った。

図5の破線部は電子回路製作部分を示している。ここでは、演習中に配布した回路図を基にユニバーサル基盤を用いて、少数の一般的な電子部品の実装と手配線による接続を実施した。これにより電子回路製作に関する基礎的な技能を学習させながら、基本的な回路図の読解力を養った。メカの部分とハード部分を統合するシステム化の作業工程においては、全体の技術的バランス感覚と技能が、この過程で大きく養われる。本教材のメカを含めたハードウェアは、以下のようなスケジュールの配慮や教育効果を期待して、教材化を行っている。なお、写真にないが実際には導線やコネクタ、半田やマイコン動作確認用LEDなども用意しており、本教育プログラムのために購入すべきすべての部品や部材は、部品調達、経済性、保守管理性を考慮した安価で一般的な部品構成としている。

4.3 視覚情報ビューア 図6は、本研究で開発した視覚センサモジュールが撮影している画像や演算結果をモニタするためのビューアである。図6(a)のビューアは元画像をモニタするとともに、元画像画素の色要素確認や二値化演算の確認、代表点表示、視差情報が表示される。図6(b)のビューアは、視覚セン

サモジュールが代表点や距離情報を演算した結果の座標を、リアルタイム的にモニタするためのビューアである。

4.4 カリキュラム 表3は本教育プログラムのカリキュラム例である。実施したカリキュラムの演習内容は全部で大きく4項目あり、各1項目内の1コマが約3, 4時間の分量として、計6回のプログラムとなっている。例えば、ある学校で週1回4時間の実習が行われているとすれば、6週間の実習で合計24時間相当の内容となる。さらに、実際の授業展開までを視野に入れ、授業に組み込み可能なメカトロニクス技術を2コマ、画像処理・画像認識の基礎技術学習が2コマ、視覚情報による自律型ロボットの動作実験を2コマ設定し、それぞれのテーマがつながりをもって完結する、弾力性のあるカリキュラムになるように配慮した。これにより、場合によっては単一のテーマのみを扱ったり、テーマごとに異なる担当者を配置することも可能である。

5. 教育実践

5.1 教材用ロボットの製作 ロボットの製作は、駆動系の組立とモータドライブ回路製作、および視覚センサを含めたシステムインテグレーションである。生徒にとってメカ部分は物足りなさを感じさせるくらいの内容であり、短時間で製作が完了した。これにより当初の計画通り、手配線、半田付けといった電子回路の基盤の製作とシステム化に時間のゆとりをもたせることができ、技術教育に重要であるが、実際の実習

Fig. 5 Block diagram for education robot system

(a) Visual processing view (b) Processing result view

Fig. 6 Vision system information viewer

Table 3 An example of educational curriculum

Subject	Contents
Robot Manufacturing (1 st ~2 nd week)	<ul style="list-style-type: none"> Guidance Manufacturing of robot body Manufacturing of motor control circuit board
Image Information Processing Basic & Handling (3 rd week)	<ul style="list-style-type: none"> Manufacturing of Motor Control circuit board Stereo Vision Module mounting Connection and Operating check
Stereo Vision Basic Learning (4 th week)	<ul style="list-style-type: none"> Color System, Binarize, noise reduction Stereo Vision Module Handling exercise
Experiment of Vision Robot (5 th ~6 th week)	<ul style="list-style-type: none"> Image Data Processing using Viewer Data reduction/Graph (disparity-distance) Visual Information Processing programming exercise Viewer Handling for image processing operation Object Tracking control programming Operating check & debugging Color Extraction Tracking Robot Control Experiment Distance Recognition Programming Operating check & debugging Distance recognition Robot Control Experiment

や演習ではあまり時間が裂けない回路構成の確認や、回路の接続チェックなどに余裕をもてるシステム工作演習の時間配分に、簡素化したロボットシステムが生かした結果となった(図7(a)).

5・2 画像情報処理基礎学習 ここでは、視覚センサモジュールが出力する YIQ 表色系とビューアの RGB 表色系の関係と、YIQ から RGB への変換方法、画像情報処理の基礎知識としてカラー画像情報の二値化手順、二値化画像のノイズ除去法、代表点算出などの実践的な学習、および本教材の視覚センサモジュールの扱い方、PC へのデータ転送方法など、図6(a)のビューアを活用した教育を実践した。

5・3 ステレオビジョン基礎学習 次にステレオビジョンの演習を実施した。ステレオペア画像で平行な撮影が可能な場合、その画像の視差から距離情報 Z が得られることを学習させた。演習での実験では、約 $\phi 76 \text{ mm}$ の赤いボールと $\phi 38 \text{ mm}$ 卓球の二つのカラーボールを用いた。それぞれ 10 cm 間隔で視覚センサから 80 cm まで遠ざけたとき、二値画像から算出される代表点の視差画素数を測定データとして記録させ、グラフにまとめる指導を行った(図8)。このグラフから、距離とともに視差の測定値が変化することや、両者の曲線が一致することを理解させることで、大きさに依存しない距離計測がステレオペア画像から得られる体験教育を行った。

5・4 両眼視覚ロボットの動作実験学習 この学習は、両眼視覚ロボットによる自律行動実験の演習である。この演習では最初に、画像処理の基礎である視覚対象物の実空間位置と、視覚センサで撮影された対象物の座標関係を説明し、視覚センサの演算結果から対象物の三次元空間位置を求める方法を指導した。次に、視覚センサ情報から対象物とロボットの位置関係が把握できるので、ロボットの制御プログラムを構築する段階の学習は、簡単な条件分岐のプログラム構造をベースに、入力情報を単純に領域分けし、その領域に対応するモータの出力を設定することで、ロボット

の運動が実現できることを学習させた。主なプログラミングの学習は、視覚センサの画像処理に関連した対象物の閾値設定プログラムと、ロボットの運動制御に関連する二値的なモータ制御のプログラム作成である。このプログラミングが完成すると、ソフトウェアとハードウェアが連携した、両眼視覚ロボットのシステム全体の動きが実現することになる。具体的には、SVO センサモジュールによって得られた画像情報から、対象物の代表点座標と距離情報をこのモジュールで算出し、この演算結果がモータを制御するプログラムに渡され、その情報を基にロボットを制御することで、ハードウェアが正常に動作することを生徒に確認させた。図7(b)は、PC を用いた学生の確認実験の風景を示す。本教育プログラムは、総合化システムの学習を目指した教育であり、この技術教育では、総合的な製作を通して自己の創造性を育成するので、メカやハードを含めたデバック作業、問題解決は非常に重要な要素となる。このため、デバック作業の時間を十分にとり、教育目標に取上げている問題解決能力や自主的な学習態度を育成することとした。

上記の学習を踏まえて、図9に示す二つの実験を行った。実験1は図9の上段部の1から6の写真に実験風景を示すが、複数の対象物を用意し、その中で目標とする色を識別し(色識別)、対象の色の目標物を追従させる実験である。また、実験2は図9の下段部の写真に実験風景を示すが、予め設定した対象物からの位置に、SVO センサモジュールから算出した距離情報を用いて、自律的に停止させる実験である。実験2では図8の基礎実験データ(5・3節)と実機の停止距離を比較させ、基礎データと実験データとの対応を考察さ

(a) Hardware manufacture (b) Software exercises

Fig. 7 Practice of a manufacture and an experiment

Fig. 8 Disparity vs. distance experimental results obtained by students

せる演習を行った。双方のデータはほぼ一致した良好な結果が得られ、2枚の画像から距離測定が行えることを体験させた。この演習は生徒達に驚きや感心、技術的満足感を与える有意義な学習となった。

6. 実施結果

この教育プログラムを受講した生徒は、全部で10名である。事前調査(3・1節)とすべての演習を終えたこの10名に、表4に示す到達度調査および意識調査アンケートを実施し、本教育プログラムの効果を確認した。

6・1 習熟度調査 本アンケートはカリキュラムに合わせて4テーマに分類し、その中をさらに各々4観点で質問を策定し、アンケートの各質問に対し、「はい」、「いいえ」の二者択一で答えてもらった。このアンケート結果を図10に示す。その結果、多くの生徒が各項目についてほとんど「はい」を選択している。

本教育プログラムは、視覚ロボットを通して実践的な技術を積上げ、基礎的な視覚技術を体験させるものであり、アンケート各項目の満たされ方が大きいほど、生徒が教材に対し興味関心をもって意欲的に取組んだこととなる。この結果は、本教育プログラムが教育目標を達成し、少なくとも習熟度調査質問項目の教育効果を生んだことは、基礎技術教育において大変有意である。

一方、「いいえ」と答えた質問内容を調べてみると、システム化やプログラミングに関する項目であった。これらはより専門性を必要とする内容であり、個々の適性や技術力の差が現れやすくなっていることを示している。教材内容や時間配分、指導方法の改善や

工夫に留意する技術項目であることがわかる。

6・2 意識調査 本研究に関連する技術分野に対する受講生徒の意識を調査するため、表4(b)の意識調査を行った。この調査では各々の質問に対し、満足、やや満足、普通、やや不十分、不十分などのように五段階評価で答えてもらった。その結果を図11に示す。事前調査では、「ロボット製作に興味を持っているが、現在まで視覚センサや画像認識技術等が意識になかった」と答えていることを前提に、本アンケートが示した結果は、以下の通りである。

Table 4 Questionnaires of both academic achievements and student's attitude toward robot technology after program

(a) Academic achievement (answer is "Yes" or "No")

Section	question
Robot Manufacture	1) Could you use tools?
	2) Did you have enough time to make the robot manufacture in the class have?
	3) Could you solder electrical circuit?
	4) Could you make an electrical circuit by using a electrical diagram?
Basic Image Information Processing	5) Did you understand the relation between YUV and RGB color system?
	6) Did you understand binarization process?
	7) Did you understand noise reduction method?
	8) Could you get Image information data in a computer?
Stereo Vision Technology	9) Could you perform color extraction on the viewer?
	10) Did you understand calculation of representation point by using binary information data on the viewer?
	11) Could you measure the disparity property on the viewer?
	12) Could you draw the graph by using the disparity data?
Tracking Experiment	13) Could you make a program by using the representation point?
	14) Could you complete tracking program by using the representation point?
	15) Could you check operation of both software and hardware system?
	16) Could you realize tracking experiment of a target by using was able to be conducted tracking by using color extraction results?
Distance Recognition Experiment	17) Could you use distance information in programming?
	18) Could you check execution of programming?
	19) Could you realize distance recognition experiment?
	20) Could you check the correspondence of experience data with the distance data estimated by the disparity data?

(b) Attitude survey (answer is 5 grade evaluation)

Impression	1) Is Making a robot pleasant?
	2) Is Programming enjoyable?
	3) Do you have experience in Vision robot system?
	4) Is this technology important?

Fig. 9 Schematic figures of both color ball tracking experiment and distance measurement experiment by using the robot

Fig. 10 Academic achievement questionnaire answer (circle number indicates the questionnaire number. Radius of the circle indicates the rate of "Yes" answer)

Fig. 11 Attitude survey questionnaire answer

質問1 生徒によって感じ方の度合いは異なるものの、すべての生徒に「ロボット作りは楽しい」と感じさせる動機付けを行うことができた。

質問2 この質問についても生徒によって感じ方の温度差はあるが、すべての生徒が「プログラミングを楽しめた」と答えている。演習で必要とされるプログラミング技術は、非常に単純なプログラム演習であったにもかかわらず、意識調査では楽しいと感じさせられる演習となっている。これは教材全体の流れからそのような意識になったと考えられ、教材のテーマ設定が重要であることを示している。

質問3 すべての生徒が「視覚ロボットを体験できた」と答えている。教材から必然的な回答であると解釈できる。しかし、事前調査では視覚センサに対する意識が全くなかった生徒が、本教育プログラムによって新たな技術分野を知った、という結果であり、大きな教育的成果を示している。

質問4 さらに、本教育プログラムは視覚技術教育の基礎的なもので、専門的にその内容を深く学習していないにもかかわらず、生徒達は全く触れたことのない視覚技術を感覚的に、「この技術は重要である」と感じている興味深い結果が得られた。

7. おわりに

本研究では、これまでほとんど報告されていない両眼視覚自律行動ロボットの実践的教材開発と、技術教育領域を開拓した。さらに、教材化から教育プログラムの展開、および実施に伴う実態調査から次のことが明らかになった。

まず最初に、5・4節に示した教育目標は、アンケート結果および学生の実習態度から、ほぼ初期の目標は

達成されたと思われる。次に、事前調査、事後調査から、高校生の技術教育に対する意識において「今後重要な技術であると考えられる視覚技術を、我々はこれまで触れる機会がなかった」ということが、技術教育の現状として、総括的に本研究から浮かび上がってきた。ほぼ同等な教育環境、技術水準にある工学系大学1, 2年生に対しても、同様なことが事前調査質問項目から言えるであろう⁽¹⁷⁾。さらに、演習ではロボット技術の楽しさを実感させながら動機付けを行い、個々の基礎・基本技術や興味・関心を高める十分な教育で、これらの調査からも教育目標を満たせる有用な教材であると考えられる。

以上示したように、今回のアンケート調査から本教育プログラムの効果が明らかになったが、教材等の理由から10名の小人数を対象とし、また、評価についてはアンケート調査の主観評価が主体となった。今後、この教育プログラムの効果をより客観的に明らかにするためには、対象人数を拡大し、客観的な手法を用いることで、その特徴がより明らかになるものと考えられる。

従来の技術教育の初期段階におけるメカトロニクス関連の技術教材は、センシングデバイスとして赤外線センサを利用した教材がほとんどであるが、本論文のように容易に扱うことのできる両眼視覚センサデバイスが普及すれば、昨今のロボット技術の重要な位置付けとなっている視覚と、メカトロニクス技術教育を同時に教育できる工学教材として、基礎技術教育に大きく寄与するものと考えている。

本論文は、小型両眼視覚センサデバイスを教育に適した一つの事例の提案に過ぎず、著者らはこのような初期段階の技術教育や、低水準技術領域における視覚デバイス技術の確立と応用範囲の拡充など、ロボット技術を支える視覚技術の発展を目指している。

文 献

- (1) Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, *Science and Technology white book 2005 "Basic Law on Science and Technology, and Basic Plan on Science and Technology"* (in Japanese), (2005-6).
- (2) Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, *Ministry's curriculum guideline of a high school* (in Japanese), (1999-3).
- (3) Morishita T., Practice of the Technical Education Program for High School Students using a Small Stereo Vision Autonomous Robot, *Proceedings of 2006 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (in Japanese), (2006-5), pp. 2 A 1-B 22.
- (4) Morishita, T., Development of the One Board Small Stereo Vision Sensor Module for basic engineering of

- Robotics and Mechatronics, *Proceedings of the 23th Annual Conference of Robotics Society of Japan* (in Japanese), (2005-9), p. 2 I 13.
- (5) Morishita, T. et al., Development of the stereo vision sensor module for a small autonomous robot using a small camera for cellular phone, *Proceedings of 2004 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (in Japanese), (2004-6), pp. 2 P 1-L 2-39.
- (6) Okada, K. et al., Design and Development of Small Stereo Vision Sensor Module for Small Self-Contained Autonomous Robots, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, No. 3 (2005), pp. 238-254.
- (7) Okada, K. et al., Device distributed approach to extensible robot system using intelligent device unit with super-micro processor, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16, No. 2 (2004), pp. 208-216.
- (8) Inoue, H. et al., Development of Control LSI Chip for Multi Window Robot Vision System, *Transaction of Society of Instruments and Control Engineering* (in Japanese), Vol. 23, No. 12 (1997), pp. 1289-1295.
- (9) Kagami, S. et al., Design and Development of Onbody Realtime Disparity Image Generation System, *The Society of Instrument and Control Engineers, Proceedings of the 4th Robotics Symposia* (in Japanese), (1999), pp. 177-182.
- (10) Okada, K. et al., Vision-based Action Control of Quadruped Legged Robot JROB-1, *Proceeding of the 9th International Conference on Advanced Robotics ('99 ICAR)*, (1999-10), pp. 451-456, Tokyo, Japan.
- (11) Hayashi, M. et al., Development of a Small Palmtop Robot with Stereo Vision Sensor Module, *Proceedings of the 22th Annual Conference of Robotics Society of Japan* (in Japanese), (2005), p. 2 E 12.
- (12) Ohkubo, Y. et al., Portable Situation-Reporting System by a Palmtop Humanoid Robot for Daily Life, *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04)*, (2004-10), pp. 3553-3558.
- (13) Urata, J. et al., Posture sensor for a spherical joint using cellular phone micro camera, *Proceedings of the 23th Annual Conference of Robotics Society of Japan* (in Japanese), (2005-9), p. 3 E 31.
- (14) Kanade, T., Development of a Video Rate Stereo Machine, *Proceedings of the 1994 ARPA Image Understanding Workshop*, (1994-11), pp. 14-16.
- (15) Konolige, K. (Shirai, Y. and Hirose, S. eds.), Small Vision System: Hardware and Implementation, *Robotics Research: The Eighth International Symposium*, (1997-10), pp. 111-116, Springer.
- (16) Faugeras, O. et al., Real time correlation-based stereo: algorithm, implementations and applications, *Technical Report*, No. RR-2013 (1993), p. 49, INRIA.
- (17) Ogawa, K. et al., Making an Autonomous Mobile Robot in "Engineering Experiment" in the Department of Electrical Engineering of Shibaura Institute of technology, *Proceedings of 2002 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (in Japanese), (2002-6), pp. 1 A 1-K 11.