

令和 2 年 7 月 5 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06302

研究課題名（和文）長距離検知を可能にするステレオ視方式三次元距離センサーLSIに関する研究

研究課題名（英文）Detection range extension method for single-chip stereo vision range sensor LSI.

研究代表者

有馬 裕（ARIMA, YUTAKA）

九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・教授

研究者番号：10325582

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：ステレオ視方式三次元センサーにおいて光学レンズとイメージセンサー間に設置した透明板を傾けることで検知距離を変調できることを実機による評価実験で確認した。この原理機能を応用して、二つのイメージセンサー間隔が8mmと狭いシングルチップ三次元距離センサーLSIを用いても10mを超える範囲の距離を検知できることが確認できた。また、複数の相関信号値を比較する距離補完手法により従来より少ない視差数の検知信号だけでもより多い階調の距離検知が可能なが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

このステレオ視方式三次元距離センサー用の検知距離拡張技術が確立できれば、屋外を含む様々な環境下で10～100mのリアルタイム長距離検知がシングルチップの三次元距離センサーLSI 1個で実現できることになり、従来と比べ劇的な装置の小型化と低コスト化が実現できる。それにより、三次元センサーの普及は様々な分野に広がり、安全や安心、周辺環境を把握した高度な電子機器制御やロボット制御など、社会環境の高度化や安全実現への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We confirmed that the detection distance of the stereo vision three-dimensional sensor can be modulated by tilting the transparent plate placed between the optical lens and the image sensor. Applying this principle function, we have confirmed the distance detection in the range of 10 m even with the single-chip three-dimensional range sensor LSI whose image sensor interval is 8 mm. Moreover, we have confirmed that the distance complementation method that compares several correlation signals can detect the distance of more gradations with only the detection signals with a small number of parallax signals.

研究分野：工学

キーワード：三次元距離センサー ステレオ視 透明板 画像シフト 検知距離シフト

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

三次元距離センサーは、自動車の衝突回避システムやロボットビジョン、ゲーム機や電子機器等周辺の空間センシングなど、様々な応用が期待されている。我々はこれまでに、二つのイメージセンサーと高速相関検知処理回路をシングルチップに集積したステレオ視方式三次元距離センサーLSIの研究開発に取り組み、リアルタイム(100fps)三次元距離計測に成功している[1][2][3]。ステレオ視方式の距離センサーは、TOF (Time of Flight) 方式などのアクティブ方式と比べ変調光を照射する必要がなく、その照射光の減衰による検知範囲の制限や外光量の影響を受け難く耐環境性に優れているが、距離検知精度がイメージセンサーの画素数に依存するため、チップサイズを維持したまま距離検知精度を向上させることが困難であった。また、遠い距離を検知するためには、二つのイメージセンサー間隔を長くする必要があり、LSIチップ上に集積可能な10mm間隔程度では長距離検知は困難だった。例えば、イメージセンサー画素ピッチが $6\mu\text{m}$ 、横画素数が640、センサー間隔が10mmの場合、画角90度で、2m程度迄しか正確には検知できない。車載用途では、数100m程度の距離検知が必要で、イメージセンサー間隔は30cm程度必要であり、装置の小型化はもとより数cm角のLSIチップに集積することは不可能であった。そのことが装置の普及を阻んでいた。

2. 研究の目的

ステレオ視方式の三次元距離センサーは、屋外での利用や長距離検知など汎用性に優れているものの、装置の小型化や低コスト化が困難な為はその普及が進んでいない。そこで、数cm角の三次元距離センサーLSIで従来の数10倍以上の長距離検知を可能にする基礎技術を開発する。具体的には、LSIチップ上に集積可能な10mm間隔の二つのイメージセンサーでも100m程度の距離検知を実現する手法を提案し、その技術の要となる高速で精度の良い画像シフト技術を開発する。そして、実際に三次元距離センサーLSIとその光学装置を試作し、その長距離検知性能と距離精度の評価実験を行い、その有効性を実証すると共に、考案手法の可能性を明らかにする。

【特色】従来は、シングルチップの三次元距離センサーLSIで数m以上の距離検知は不可能であり、10~100m程度の検知を実現する提案手法に特色がある。それを可能にする基礎技術は、図1内に示す様にイメージセンサーとレンズの間に透明のアクリル板(ガラス板でも良い)等を設置して、そのアクリル版を僅かに傾けることでイメージセンサー上の画像を僅かに($0.1\mu\text{m}$ ~数 μm 程度)横方向にシフトする方法である。

【意義】この技術が確立できれば、屋外を含む様々な環境下で10~100mの長距離検知が三次元距離センサーLSI一チップで実現できることになり、従来と比べ劇的な装置の小型化と低コスト化が実現できる。それにより、三次元センサーの普及は様々な分野に広がり、安全や安心、周辺環境を把握した高度な電子機器制御やロボット制御など、社会環境の高度化や安全実現への貢献が期待できる。

〔補足説明〕ステレオ視における画像位置と検知距離の関係を図2に示す。この例では、各画素からの視線を実線で示し、左側のイメージセンサーに投影される画像が左側へ画素サイズの $1/3$ と $2/3$ だけシフトした場合の視線を破線で示している。左右の視線の交点が検知距離に対応する。この図内の例示で分かるように、画像をシフトしない場合の検知距離 $D1$ 、 $D2$ の間に画像シフト時の検知距離 $D1a$ 、 $D1b$ が生じる。この新たな検知距離は全ての領域で生じるので、視差がない画素間でも同様に、画像シフトを行うことで、無限遠から1画素視差で検知できる距離の間を検知できるようになる。図3は、アクリル板を傾けることで画像を僅かにシフト(Δx)できることを示している。

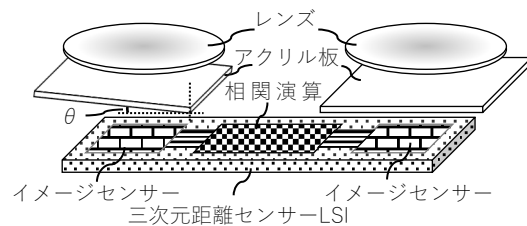


図1. シングルチップ検知距離拡張手法

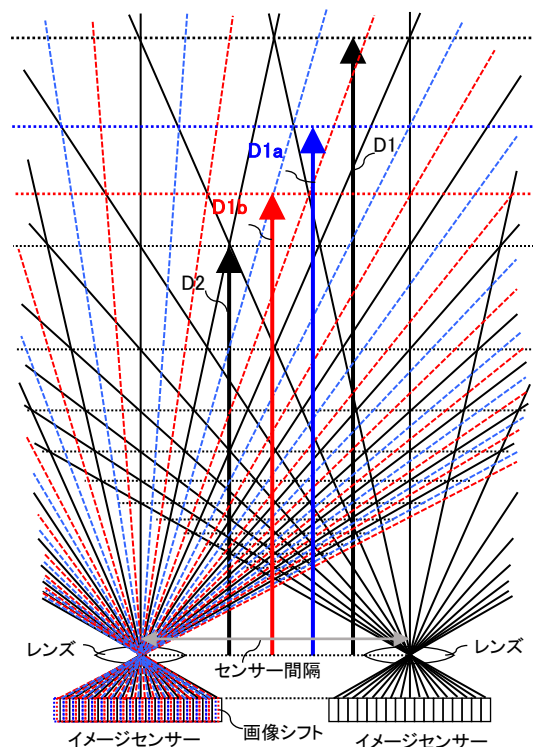


図2. 画像シフトによる検知距離の変化

3. 研究の方法

まず、市販のアクチュエータで透明アクリル板の傾きを制御する装置を試作し、今迄に我々が開発・試作した三次元距離センサーと組合せて、画像シフトに対する検知距離の変化を実機実験で評価し、アクリル板の傾きによって検知距離をシフトできることを確認し、提案手法による検知距離拡張機能の原理的可能性を実証する。

次に、シングルチップ三次元距離センサーLSIを新たに設計・試作し、そのセンサーLSI専用の光学モジュールを設計・試作し、それらを組合せた実機による評価によりアクリル板の傾きに対する検知距離のシフト量を明らかにする。そして、それら得られた知見を基に、画像シフト機構等の改良を行い新たに改良版光学モジュールを設計・試作する。最後に、それらを組合せてコンパクトな三次元距離センサーモジュールを試作し、その検知性能を評価し提案手法の有効性や問題点を明らかにする。

[研究実施体制] 研究代表者+大学院生(2名)。研究代表者が、長距離検知用のシングルチップ三次元距離センサーLSIと透明アクリル板の駆動機構に関する全体構想と基本設計を行い、その指導のもと、具体的なLSI設計および光学モジュール設計とそれらの評価実験・解析作業等は、研究代表者が教育指導する大学院生(2名)が担当し、実践的な研究教育の場としても活用する。

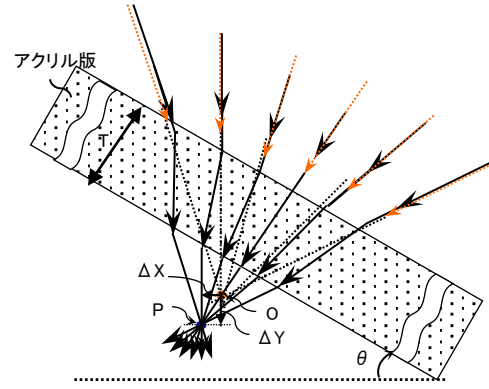


図3. 画像シフトの原理(収光)

4. 研究成果

提案方式の原理的可能性を実証するために、既存の三次元距離センサーモジュールとその光学レンズの間にアクチュエータで傾きを制御できる透明板を設置し、その透明板の傾きに対する検知距離のシフト量に関する評価実験を行った。ここで用いた三次元距離センサーは別途開発したもので、既に独自開発しているイメージセンサーLSI 2個と視差検知LSI、そしてそれらの制御用LSIを独自のSiインターポーザ上に組立てステレオ視方式三次元センサーを構成している(図4)。イメージセンサーLSIは320列240行の画素構成であり、二つのイメージセンサー間隔は80mmである。視差検知LSIでは左右の1行320画素毎に相関演算を並列に行い、左右の画像間で強い相関が検知された位置の視差情報を入力する。イメージセンサーとレンズ間に設置する透明板は2mm厚のアクリル板を用い、その透明板はピエゾアクチュエータ(Piezo Systems:T434-A4-302)によりその傾きを調整可能にした(図5)。

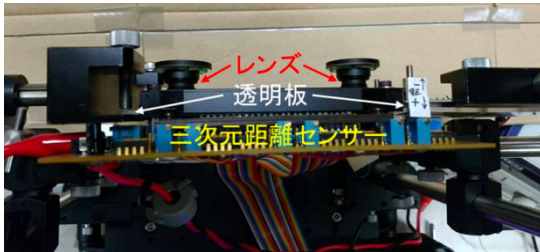


図4. 実験用装置(三次元センサーモジュール)[4]

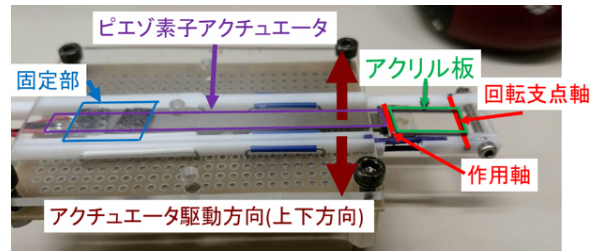


図5. 透明板とアクチュエータの構成[4]

まず、アクチュエータの印可電圧に対する透明板の傾きを評価した。印可電圧 $-24\text{V} \sim 24\text{V}$ に対して、透明板の傾きは $-0.49 \text{度} \sim 0.57 \text{度}$ に変化することを確認した。提案した計算式により、その透明板の傾きと厚さから画像のシフト量は算出できる。次に、アクチュエータの印可電圧による三次元距離センサー検知距離の変化を評価し、透明板を僅かに傾げることで検知距離が前後にシフトすることを確認した。アクチュエータの印加電圧を $-24\text{V} \sim 24\text{V}$ に変えると、画像シフト量は $-5.7\mu\text{m} \sim 6.6\mu\text{m}$ 変化し(図6)、検知距離は $300\text{cm} \sim 400\text{cm}$ に変化した(図7)。これらの実験評価によって、提案手法による検知距離拡張の原理的可能性を確認できた。

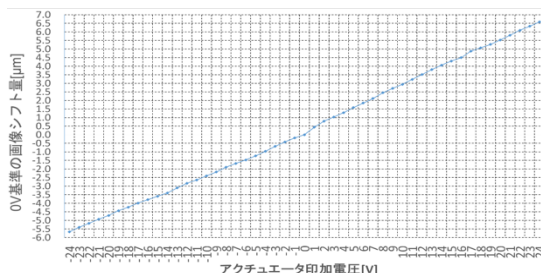


図6. アクチュエータ電圧と画像シフト量の関係[4]

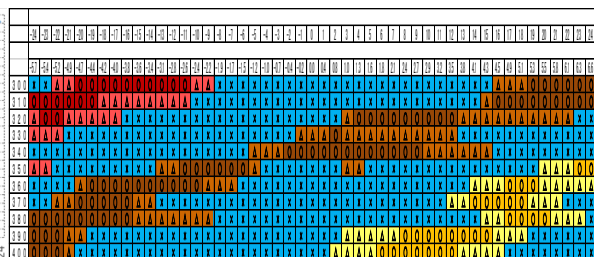


図7. アクチュエータ電圧と検知距離(反応回路)[4]

更に、シングルチップ LSI 内に集積された間隔が 8mm の二つのイメージセンサーにおける検知距離拡張性能を評価するために、新たにシングルチップ三次元距離センサー LSI を $0.35\mu\text{mCMOS}$ 1-poly 4-metal プロセスも用いて設計し試作した (図 8)。

試作したシングルチップ三次元距離センサー LSI (チップサイズ: $10.0\text{mm} \times 2.5\text{mm}$) の機能動作を検証して正常に動作することを確認した。そして、当該三次元距離センサー LSI 用のコントロール信号や出力信号を制御するためのマイクロコードを格納した制御用 LSI ($0.35\mu\text{mCMOS}$ 1-poly 4-metal、チップサイズ: $9.97\text{mm} \times 4.02\text{mm}$) をコンパクトにアセンブリするための新たに Si インターポーザを試作し、実際にそれらを組み立てて動作検証を行い正しく動作することを確認した。

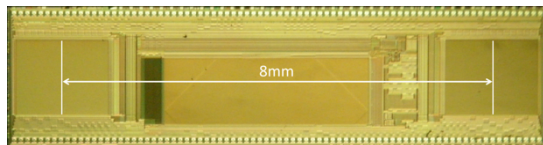


図8. 試作した三次元距離センサー LSI チップ写真[5]

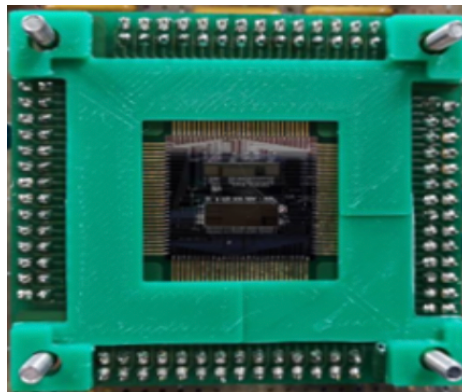


図9. 三次元センサーモジュール写真[5][6]

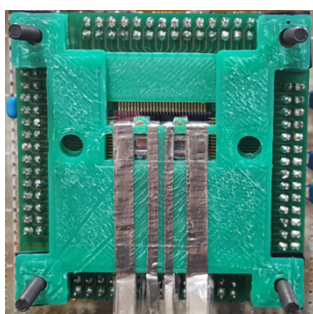


図10. 画像シフト機構搭載モジュール写真[5]

Si インターポーザ上に組み立てた三次元距離センサーモジュール (図 9) と、それ専用試作した光学モジュール (図 10) を組み合わせた実験用モジュールを用いて、提案手法であるイメージセンサーとレンズ間に設置した透明板を傾けることで検知距離の変調を実現する機能に関する予備実験を行い、透明板の角度変化が 0.87 度で検知距離が約 0.3m (距離が 2.4m において) 変調することが確認できた。この予備実験では静電気を駆動力として透明板を傾ける実験を行なったが、透明板を十分傾げるためには 100V 近い高電圧が必要であった。そこで、他の駆動手法を検討し電流磁場を用いる方法についても実験を行い 10mA 以下の電流で駆動できる機構などについても試作し評価した。

次に、距離補完手法と検知距離拡張機能の評価するために、試作したステレオ視方式シングルチップ三次元距離センサー LSI (チップサイズ: $10\text{mm} \times 2.5\text{mm}$) を用いて、各レンズとイメージセンサー間に挿入した透明板の傾きをネジの回転で微調整できる機構を設けた三次元センサーモジュール (図 11) を新たに試作し、そのシングルチップによる検知距離変調機能の評価実験を行った。左右二つのイメージセンサーとそのレンズ間に挿入した透明板 (厚さ $400\mu\text{m}$) は、一方が二つのイメージセンサーの視差方向 (横方向) に、他方がイメージセンサーの縦方向にそれぞれの画像がシフトできるように、その透明板の傾きをネジ (0.2mm ネジ山ピッチ) の回転でそれぞれ微調整できる。

この試作モジュールを用いた実験により、縦方向の微調整で相関画素ラインの位置を補正でき、横方向の微調整で検知距離を連続してシフトできる機能を確認実証することができた (図 12 ~ 15)。この機能により、レンズのアセンブリ精度限界 ($\sim 50\mu\text{m}$ 程度) に伴う検知距離のバラツキ (画角 27 度の 3m で $-1.5\text{m} \sim 15\text{m}$) を高精度に補正可能になり、シングルチップにおける狭間隔ステレオ視センサーでも高精度な検知距離補正制御 (検知距離の $1/10$ 以下) が

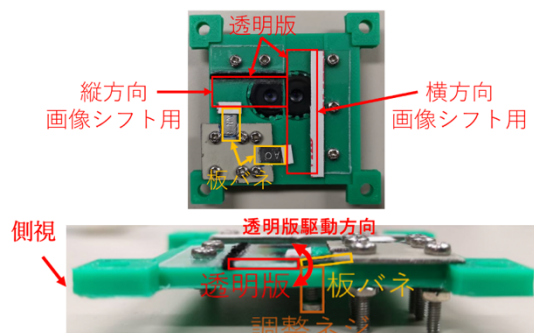


図11. 三次元センサーモジュール写真[6]

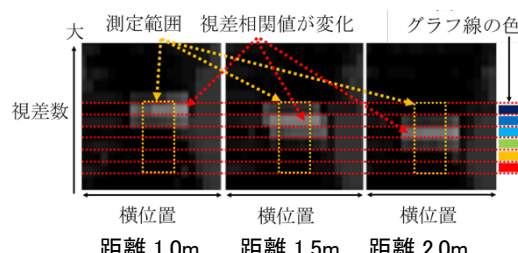


図12. :画像シフトによる相関信号の変化[6]

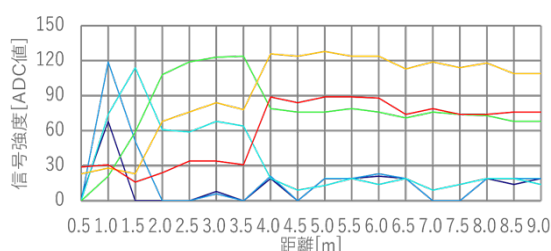


図13. 距離補完信号 (画像シフト量: $+1.45\mu\text{m}$) [6]

可能となり、シングルチップサイズでの数10m以上の検知距離範囲が実現できることが見積もられた。

試作したプロトタイプモジュールの評価では、画素間の視差相関信号のS/Nが悪く、視差画素相関信号による検知距離補間において十分な精度が得られない課題が明らかになった。その視差相関信号のS/Nを低下させる要因の一つとして相関信号が検知対象物の位置と輝度に依存して信号値が異常に変動する場所があることが確認された。そこで、焦点距離が長い光学レンズを新たに導入して、検知画素ピッチ当りの撮像サイズを大きくすることで検知距離を更に長くしS/Nの改善を目指した。

また、試作した光学モジュールを利用した実験により、より少ない相関信号を用いてそのレベル比較によって検知距離の補完が可能であることを確認した。従来は、最大の相関信号を検出した相関アドレスで離散的に距離を検知しており距離補完はできなかった。それにより5~8視差程度の相関検知だけでも十分な距離検知ができることが見積もられ、従来より少ない相関回路(10分の1以下)により、今後のステレオ方式三次元センサーの更なる高集積化が期待できる。

距離検知信号のS/N性能に関しては未だ不十分であったが、ソフトウェアによる後処理等で経過時間平均化するなどの工夫によってある程度改善できる見込。

<引用文献>

- [1] M. Kawano, N. Kawaguchi, T. Yoshida, and Y. Arima, "Three-Dimensional Binocular Range Sensor LSI with Enhanced Correlation Signal," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 4D, pp.04DE05-1-6, Published April 20, 2010.
- [2] N. Kawaguchi, M. Kawano, and Y. Arima, "Three-Dimensional Binocular Range Sensor Large Scale Integration with a 410 μ s/Frame Output Time High-Speed Data Output Method," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 4D, pp.04DE06-1-4, Published April 20, 2010.
- [3] M. Kawano, and Y. Arima, "Binocular range-sensor LSI with improved distance detection precision by coordinated pixel placement," IEICE Electronics Express, Vol. 11, No. 19, pp. 20140747-1~11, October 11, 2014.
- [4] 橋川 晃、卒業論文 "ステレオ視方式三次元距離センサーにおける透明板を用いた検知距離高精度化手法" 2017年2月
- [5] 仲島拓真、修士論文 "ステレオ視方式三次元距離センサーLSIにおける検知距離拡張手法に関する研究" 2018年2月
- [6] 橋川 晃、修士論文 "ステレオ視方式三次元距離センサーの検知距離拡張技術に関する研究" 2019年2月

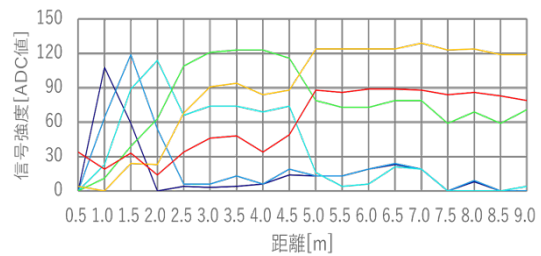


図14. 距離補完信号(画像シフト量: $\pm 0.0\mu\text{m}$) [6]

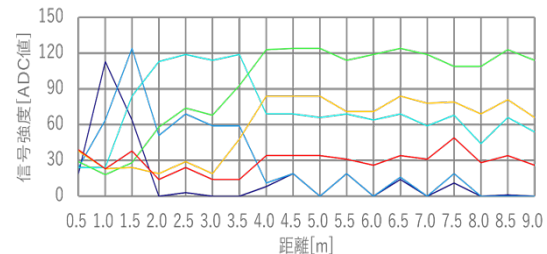


図15. 距離補完信号(画像シフト量: $-1.26\mu\text{m}$) [6]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 有馬 裕	4. 巻 第68巻、第6号
2. 論文標題 ステレオ視方式三次元距離センサーLSI	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 三次元距離センサー装置	発明者 有馬 裕	権利者 国立大学法人九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、6635590	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----