

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏 名	関口 和人	学籍番号	1250021
論 文 題 目	輝度情報の光学的圧縮による高速な自己位置推定		
<p>要 旨</p> <p>運動計測は、人間の身体各所の位置や速度などを計測する技術であり、現在様々な手法が提案されている。しかし、人間が行う運動は多岐にわたるのに対し、単一の手法でそれら全てを計測できるものは存在しない。これは、既存の手法では高速な運動、広範囲にわたる運動、移動体内部で行われた運動の3種類を全て計測するのが困難であることに起因する。</p> <p>この問題を解決するため、加藤らは画像処理を用いた自己位置推定手法に着目し、計測環境を撮影して得られた輝度値分布を1次元に圧縮して移動量計測を行う手法を提案した。この手法は計測環境の輝度分布を利用して移動量計測を行うため、計測範囲に制限を受けることがない。さらに、得られた輝度情報を1次元に圧縮するため、高速な計算が可能である。加藤らが行った検証実験では、この手法によって移動量計測が可能であること、高速な計算が可能であることが示された。しかしながら、実際に高速な運動が計測可能であるかは課題として残されていた。</p> <p>本論文では、リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いた構成により、高速な運動の計測実験を行った。この実験結果を通し、972fps で運動計測が可能であること、計測環境による精度への影響が少ないことを実証した。</p> <p>次に、計測精度を改善するため構成要素の検討を行い、設計方針を示すとともに、その構成によって計測精度と安定性を大幅に上昇させることが可能であることを示した。</p> <p>さらに、複数個の装置を用いる効用について検討を行った。本手法の問題点のひとつとして、実移動量を単一の装置から算出できないことが挙げられる。この問題に対し、本論文では装置 2 台を平行に並べることでフレーム間実移動距離を直接算出する構成を提案した。並進移動実験結果から、この構成で実移動量の直接算出が可能であることが示された。</p> <p>今後の展望としては、回転移動の計測実験を行うこと、2 次元・3 次元運動の計測実験を行うこと、光学系設計をさらに改良し、計測精度を改善することなどが考えられる。</p>			

平成 25 年度修士論文

輝度情報の光学的圧縮による高速な自己位置推定

大学院情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻

学 籍 番 号 : 1250021
氏 名 : 関口 和人
主任指導教員 : 野嶋 琢也 准教授
指 導 教 員 : 小池 英樹 教 授
指 導 教 員 : 末廣 尚士 教 授
提 出 年 月 日 : 平成 26 年 2 月 21 日

第 1 章	1
1.1 運動計測の問題点.....	1
1.2 問題解決のアプローチ.....	5
1.3 本研究の目的.....	6
1.4 本論文の概要.....	7
第 2 章	10
2.1 設置型運動計測手法	10
2.1.1 LED と撮像機を併用する運動計測手法.....	10
2.1.2 高速カメラを用いた運動計測手法	11
2.1.3 赤外線センサを用いた運動計測.....	12
2.2 自律型運動計測手法	13
2.2.1 加速度センサを用いた運動計測手法.....	13
2.2.2 市販カメラを用いた運動計測	14
2.2.3 深度カメラを用いた運動計測	15
2.2.4 深度カメラと加速度センサを併用した運動計測	17
第 3 章	19
3.1 手法の要件	19
3.2 運動量計算原理	20
3.3 提案手法の高速化.....	23
3.3.1 計算量の低減.....	23
3.3.2 フレームレートの高速化	23
3.4 2 次元, 3 次元運動の復元.....	24
3.5 期待される効果	25
3.5.1 広範囲にわたる運動の計測.....	25
3.5.2 移動体内部での運動計測	26

3.5.3	高速な運動の計測	26
第 4 章	.....	27
4.1	実験目的と評価項目	27
4.1.1	高速性の検証	27
4.1.2	被写体による精度変化の検証	28
4.2	実験装置	29
4.2.1	機材詳細	31
4.2.2	ソフトウェア詳細	36
4.3	プロトタイプ評価実験	39
4.3.1	高速並進運動計測実験	39
4.3.2	計算速度評価実験	45
4.3.3	自然環境における計測実験	47
4.4	評価実験の結論	50
4.4.1	高速性の検証	50
4.4.2	被写体による精度変化の検証	51
第 5 章	.....	52
5.1	実験目的と評価項目	52
5.1.1	構成変更による精度変化	52
5.1.2	被写体距離による精度変化	53
5.1.3	被写体特徴による精度変化	53
5.2	スリット設計と計測精度	53
5.2.1	センサ-スリット間距離による精度変化	54
5.2.2	スリット位置による精度変化	54
5.3	スリット位置・幅による運動計測精度評価実験	55
5.4	検証実験より得られた装置の改良方針	64

5.5	装置構成の改良	64
5.6	自然環境における計測精度比較実験	68
5.7	評価実験の結論	78
5.7.1	構成変更による精度変化	78
5.7.2	被写体距離による精度変化	79
5.7.3	被写体特徴による精度変化	79
第 6 章	.....	80
複数の装置を利用する効用	.....	80
6.1	本手法の移動量計算の問題点	81
6.2	実移動距離の直接計算	81
6.2.1	センサ个体差	83
6.3	期待される副次的効果	84
6.3.1	精度の改善	84
6.3.2	移動量計算の安定性向上	84
6.4	システム構成	85
6.5	実験	89
6.5.1	目的	89
6.5.2	実験内容	89
6.6	考察	95
6.6.1	被写体距離の算出	95
6.6.2	実移動量の直接計算	95
6.7	実移動量計算の結論	96
第 7 章	.....	97
7.1	今後の展望	97
7.1.1	回転移動の計測	98

7.1.2	光学系要素の検討.....	98
7.1.3	並進・回転運動の計測, 3次元運動の計測.....	99
7.1.4	アルゴリズム検討.....	99
7.1.5	計測装置の無線化.....	99
7.2	原理上の問題点.....	100
7.2.1	原理的に計測が困難になる状況.....	100
7.2.2	高速性と光量.....	101
7.2.3	低速な運動の計測.....	103
参考文献.....		104
謝辞.....		107
発表文献.....		107

目次

Fig. 1-1 従来手法の分類. 横軸を計測範囲, もしくは条件の制限, 縦軸を時間 的分解能として分類してある.	5
Fig. 2-1 Phasespace を使った計測風景	11
Fig. 2-2 サッカードミラー	12
Fig. 2-3 HiBall.....	13
Fig. 2-4 Xsens.....	14
Fig. 2-5 システム全体図.....	15
Fig. 2-6 運動計測実験の環境と再現された運動	15
Fig. 2-7 システム構成	16
Fig. 2-8 Lui らが行った位置計測実験.....	17
Fig. 2-9 システム模式図(左)とシステム全体図(右)	18
Fig. 3-1 輝度分布と輝度平均.....	20
Fig. 3-2 提案手法の模式図	24
Fig. 3-3 加藤らを使用した 3 次元運動計測装置の構成	25
Fig. 4-1 実験装置外観. それぞれ, 左上: 装置前面, 右上: 背面, 左下: 内部, 右下: 部品一覧を示す.	30
Fig. 4-2 「S10077」画像	31
Fig. 4-3 「00800004」画像. (a):正面, (b):右側面を示す.	33
Fig. 4-4 「Arduino UNO」画像	34
Fig. 4-5 プロトタイプカバー画像. (a):側面図, (b):内部図を示す.	36
Fig. 4-6 使用したセンサの出力電圧波形. AO1,AO2,・・・は画素 1 番目, 2 番 目,・・・の出力電圧を示す.	38
Fig. 4-7 ノイズ補正前後の輝度分布を比較したグラフ	39

Fig. 4-8 実験環境.....	41
Fig. 4-9 実験環境の模式図	41
Fig. 4-10 実験で用いた人工画像	42
Fig. 4-11 高速並進運動計測結果. 標準偏差は提案手法のもののみ掲載.....	42
Fig. 4-12 高速並進移動実験結果（加藤らの手法の結果のみ）	43
Fig. 4-13 実環境実験の環境	48
Fig. 4-14 実環境実験結果と画像を用いた実験結果の比較.....	48
Fig. 4-15 移動量計算までの簡潔な過程	50
Fig. 5-1 カラーボックス.....	56
Fig. 5-2 カラーボックスに人工画像を貼りつけた状態	57
Fig. 5-3 スリット位置・幅検証実験の実験環境	57
Fig. 5-4 並進運動計測結果（前方スリットのみ）	60
Fig. 5-5 並進運動計測結果（後方スリットのみ）	60
Fig. 5-6 スリット幅 1mm と 2mm で得られた輝度値分布の比較.....	62
Fig. 5-7 スリット幅 3mm と 1mm で得られた輝度値分布の比較.....	63
Fig. 5-8 新旧実験装置構成の模式図. a:旧装置の構成, b:新装置の構成 を示す.	65
Fig. 5-9 作成した新装置画像. (a):正面, (b):側面, (c):右側面を示す.	66
Fig. 5-10 新構成カバー	67
Fig. 5-11 新旧構成におけるカバー模式図の比較	68
Fig. 5-12 実験環境.....	69
Fig. 5-13 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 150mm).....	71
Fig. 5-14 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 200mm).....	72
Fig. 5-15 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 250mm).....	72

Fig. 5-16 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 300mm)	73
Fig. 5-17 移動前と 5mm 並進移動後の輝度値分布比較	74
Fig. 5-18 移動前と 25mm 並進移動後の輝度値分布比較	75
Fig. 5-19 移動前と 45mm 並進移動後の輝度値分布比較	75
Fig. 5-20 被写体距離 300mm・移動距離 20mm における移動前後の輝度値分布 比較	78
Fig. 6-1 加藤らが使用した 3 次元運動計測装置の構成 (再掲)	80
Fig. 6-2 実移動量を直接計算するための装置構成模式図	82
Fig. 6-3 システム構成	85
Fig. 6-4 用いたセンサの比較. (a):S10077, (b):S11638.....	86
Fig. 6-5 治具画像.....	86
Fig. 6-6 治具をスライドレールに固定した状態	87
Fig. 6-7 実験装置比較	87
Fig. 6-8 実験装置と治具を固定した状態.....	88
Fig. 6-9 実験環境.....	90
Fig. 6-10 被写体距離計算結果.....	92
Fig. 6-11 被写体距離 250mm における実移動距離計測結果.....	92
Fig. 6-12 被写体距離 300mm における実移動距離計測結果	93
Fig. 6-13 被写体距離 350mm における実移動距離計測結果	93
Fig. 6-14 被写体距離 400mm における実移動距離計測結果	94
Fig. 6-15 被写体距離 450mm における実移動距離計測結果	94
Fig. 7-1 原理的に計測不可能になる状況の例. 移動前後で輝度値分布が全く変 動しない.	101
Fig. 7-2 原理的に計測が困難になる状況の例. 輝度値分布が周期的に変化して	

おり，装置から見て左右どちらにどの程度移動したかをシステムでは判別 することができない.	101
Fig. 7-3 フレネルレンズの構造 [17]	102
Fig. 7-4 リニアフレネルレンズの構造 [18]	103

表目次

Table 1-1 運動計測の従来手法と特徴. 乗り物を利用する計測の可否に「△」と記されているものは, 可能だが事前準備が必要であることを示す.	4
Table 2-1 Kinect ハードウェア仕様 [16].....	17
Table 2-2 Xtion ハードウェア仕様.....	18
Table 3-1 パラメータ詳細	22
Table 4-1 実験で用いた機材一覧.....	30
Table 4-2 「S10077」仕様.....	31
Table 4-3 「00800004」仕様	32
Table 4-4 「KCEXO-3」仕様.....	34
Table 4-5 「CSI-320110」仕様.....	35
Table 4-6 並進運動終点における各手法の計測結果	43
Table 4-7 各手法による計測結果で生じた時系列ごとの RMS 誤差.....	43
Table 4-8 使用した PC のスペック	45
Table 4-9 計算速度計測結果.....	46
Table 4-10 並進運動終点における実験結果の比較.....	49
Table 4-11 時系列ごとの RMS 誤差比較.....	49
Table 5-1 スリット位置・幅の組み合わせ	58
Table 5-2 前方絞りの並進移動計測結果.....	59
Table 5-3 後方絞りの並進移動計測結果.....	59
Table 5-4 移動量 45mm の計測結果(10 回分). 移動量計算に失敗したと考えられる箇所は, 赤字で示してある.	63
Table 5-5 新構成で使用した機材一覧	67

Table 5-6 被写体距離 150mm における実験結果.....	69
Table 5-7 被写体距離 200mm における実験結果.....	70
Table 5-8 被写体距離 250mm における実験結果.....	70
Table 5-9 被写体距離 300mm における実験結果.....	70
Table 5-10 計測結果の RMS 誤差(構成ごとに提示)	71
Table 5-11 並進移動量と相関最大値・最大相関となるずれ量の比較	75
Table 6-1 センサ仕様比較	88
Table 6-2 被写体距離計算結果	90
Table 6-3 実移動距離計測実験結果	91

第1章

序論

1.1 運動計測の問題点

運動計測は、センサによって計測された情報から人間の身体各所などの位置や移動量を計測する技術である。これは Ivan Sutherland により VR への応用を目的として開発された [1]のをきっかけに研究や開発が行われ、当初はリハビリテーション支援 [2]やスポーツ選手の運動解析 [3]などに利用されてきた。近年ではそれらに加え、映画やゲームの 3DCG アニメーション生成 [4] [5]や、従来ゲームの操作などに用いられてきたコントローラに代わる直感的な入力インターフェース [6] [7]の用途としても利用されている。

現在、運動計測は人間が行う特定の運動を計測するのに利用されている。しかし、本来人間が行う運動は多岐にわたるのに対し、単一の手法で人間の運動全てを計測できるものは存在しない。そのため、人間が日常生活で行う全ての運動を連続して計測するのは困難である。

日常生活を考慮したとき、人間の運動形態は大きく 3 つに分類することが出来る。屋内、もしくは限定された狭い空間での運動、特に屋外で、広範囲の移動を伴う運動、自動車など、乗車可能な移動体内部での運動である。これらに加えて、人間の運動は激しさの観点から 2 種類に分類することが出来る。すなわち、日常生活で見られるゆっくりとした運動、あるいはスポーツのような、

高速で激しい運動の 2 つである．これらを既存の代表的な手法 3 種類それぞれで計測することを考える．

Phasespace [8]は人間の身体各所に LED マーカを取り付け，外部から撮像機で LED マーカの位置を観測することで，960Hz の高速な運動計測と高精度を両立している．しかし，撮像機の計測範囲外で行われた運動は観測できないため，広範囲の移動を伴う運動の計測は困難である．また，計測環境に撮像機を設置し，精密なキャリブレーションを行う必要があるため，事前準備が必要であるという欠点がある．

Xsens [9]は加速度センサを身体各所に取り付け，運動計測を行う．このシステムは最大 2kHz で動作し，精度も良好であるが，積分誤差の累積により精度が悪化することが考えられるため，長時間の使用には適さない．また，移動体内部で行われた運動を計測するためには，移動体自体の加速度と運動による加速度を分離する必要があるため，移動体に加速度センサを取り付けなければならない，事前の準備が必要になるという欠点がある．

Shiratori らが提案する手法 [10]は身体各所にカメラを装着し，周辺環境を撮像して得られた画像から身体各所の位置や姿勢を計測する．この手法は計測範囲に制限がなく，移動体内部で行った運動も事前準備なしで計測することができる．しかし，装着するカメラの大きさは身体運動を阻害しない程度に制限されるため，カメラの性能自体も制限される．このため動作速度は 60Hz にとどまり，高速な運動の計測が困難であるという欠点がある．

このように，人間が行うあらゆる活動を連続して計測できる手法は存在しないのが現状である．従来手法による断続的な運動計測からでは得られなかった情報を入手できる可能性もあり，この問題を解決するのは重要であると考えられる．

この問題を解決するため、先に挙げた 3 つの要素、つまり広範囲にわたって移動する状況、移動体内部で運動を行う状況、高速な運動を行う状況それぞれを計測するための要求事項を考察する。

第 1 に、屋内や屋外へ広範囲にわたって移動する運動を計測することを考える。日常生活における移動は非常に幅広く、キロメートル単位で移動する状況も考えられる。また、使用者が移動するにしたがって計測環境も多様に変化する。このような運動を計測するためには、計測範囲に制限がないこと、計測環境の情報を事前に入手しないこと、マーカを環境中に設置しないことが求められる。

第 2 に、バスや電車といった不特定な移動体を利用し、その中で行う運動を計測することを考える。移動体内部で行った運動を移動体外部から観測すると、移動体自体が発生させた時速数十 km の移動や走行に伴う加減速に、使用者の運動が加算された状態となる。このような運動を計測するためには、使用者の運動のみを切り分けて計測可能であることが求められる。

第 3 に、スポーツ中の運動を計測することを考える。サッカーや野球のように激しい動きを伴うスポーツでは、100m 四方を越えるフィールドを全速力で駆け回りながら、ときに時速 100km を超える手先運動を行うことがある。このような運動を計測するためには、フレームレートが高く、高速性に優れることが求められる。さらに、身体に装着する装置があれば、それが使用者の運動を阻害しない程度に小型・軽量である必要もある。

以上より、人間が行うあらゆる活動を計測するためには、以下の要素を全て満たす必要があるといえる。

- 計測範囲に制限がないこと
- 環境情報の収集やマーカ設置などの事前準備が必要ないこと
- 計測環境自体の運動量から使用者の運動量を切り分け，計測できること
- フレームレートが高く，高速性に優れること
- 身体に装着する装置が小型・軽量で，使用者の運動を阻害しないこと

Table 1-1 運動計測の従来手法と特徴. 乗り物を利用する計測の可否に「△」と記されているものは，可能だが事前準備が必要であることを示す.

使用デバイス	範囲制限	事前準備	乗り物を利用する計測	高速性 (fps)	運動の阻害
LED マーカ＋ラインセンサ	有	有	△	960	無
磁気ソース＋磁気センサ	有	有	△	120	無
超音波センサ	有	有	△	100	無
加速度センサ	無	無	△	2000	無
RGB カメラ	無	無	○	60	無
深度カメラ	有	無	○	30	無

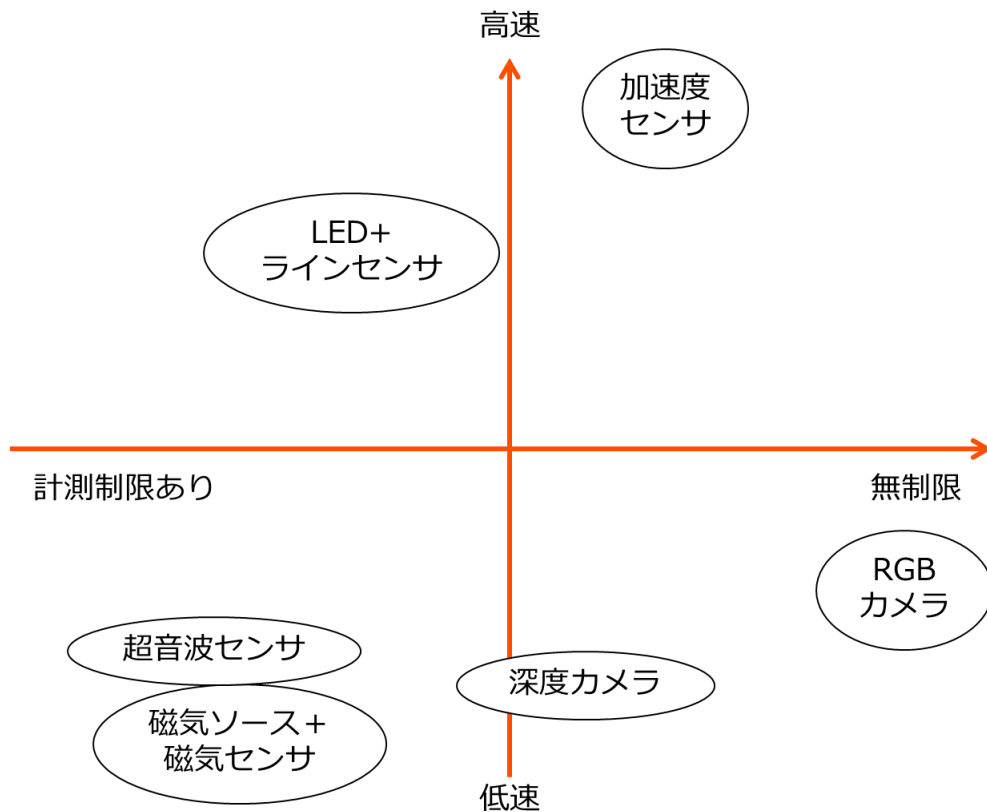


Fig. 1-1 従来手法の分類. 横軸を計測範囲, もしくは条件の制限, 縦軸を時間的分解能として分類してある.

1.2 問題解決のアプローチ

冒頭で挙げた問題を解決するため, 加藤らは計測環境から得られた画像の輝度変化を利用した自己運動推定手法に着目し, リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いて高速な運動計測を行う手法を提案した [11].

カメラから得られた画像を利用した自己運動推定手法の特徴として, 一般的な屋外や室内のように自然特徴量が十分に存在する環境であれば, 事前準備やマーカ設置を行うことなく未知環境での運動量推定が可能である点が挙げられる. さらに, カメラを身体に装着して運動推定を行うことで, 計測範囲の制限

を解決することができる。しかし、この手法の問題点として、計測速度が低速であるという点がある。加藤らは、この問題の原因がカメラのフレームレート、および計算量の多さであり、この問題を解決すれば冒頭で挙げた要素をすべて満たす運動計測が可能であるとして、カメラによって得られた画像の輝度情報を1方向に平均化して計算することで、1次元ながら高速な運動量推定を行う手法を提案した。そして、行った評価実験により以下が示された。

- 原理的に運動計測が可能であること
- 画像処理を利用した運動計測の従来法に比べ、高速な計算が可能であること
- 複数の装置を用いることで、3次元運動計測が可能であること
- センサ動作限界の 976fps でデータ取得が可能で、十分な高速性をもつこと
- 実移動量に比例した輝度分布の変化がセンサ出力より得られること

しかしながら、加藤らが行った評価実験は原理に関する検証にとどまっており、リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いた構成による高速な運動計測を行うには至らなかった。結果として、実際に高速な運動計測が可能か、また精度はどの程度かといった評価は今後の課題として残された。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、高速かつ計測環境に依存しにくい 3 次元運動計測手法を開発することである。1.2 節で加藤らが今後の課題とした問題を解決するため、リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いた構成を改良し、高速な運動計測が可能な装置を開発する。

1.4 本論文の概要

本論文では、1.3 節で挙げた目的を達成するため、リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いた構成により高速な運動の計測実験を行い、約 1kHz での運動計測が可能であることを実証した。そして、この結果から運動計測装置としての性能・特性評価を行い、考察を行った。本論文で評価を行った項目は以下の通りである。

1. 提案手法の高速性・および計測環境への依存性評価
2. 運動計測精度向上のための設計検討
3. 複数個の装置による提案手法の問題点解決

以下にそれぞれの目的と概要を簡潔に述べる。

1. 提案手法の高速性・および計測環境への依存性評価

本研究は、人間が行うあらゆる運動を計測可能な手法の開発を目的としている。先に要素として挙げたように、計測装置の性能としては高速な運動が計測できること、計測範囲に制限がないことが求められる。これを検証するため、作成したプロトタイプを用い、高速な運動の計測が可能であるか評価する実験を行う。また、計測環境を変化させて同様の高速な運動の計測実験を行い、計測環境による精度への影響を評価する実験を行う。

2. 運動計測精度向上のための設計検討

上記実験により、プロトタイプの計測精度を改善する必要があることが示された。我々は計測誤差の支配的要因が構成要素の設計によるものであると予想し、構成要素が計測精度に与える影響について検討する実験を行う。この結果に基づいて装置構成を変更し、1次元運動の計測結果がプロトタイプと比較してどのように変化したか評価を行う。

3. 複数個の装置による提案手法の問題点解決

提案手法は高速かつ広範囲にわたる運動の計測が可能であるという特長をもつ一方、3次元運動を計測するために解決すべき課題も多い。ここでは、装置を複数個用いることで、課題の1つである実移動量の計算に関する問題を解決することを目的とする。

本論文の構成は、以下の通りである。

第2章：運動計測の関連研究を紹介する。

第3章：提案手法の原理を述べる。併せて、提案手法の特徴と考えられる応用について述べる。

第4章：作成したプロトタイプを紹介し、行った評価実験について述べる。

第5章：第4章で判明した計測精度と装置構成に関する問題を解決するために行った検証実験について述べる。その後、改良した装置構成を紹介し、行った評価実験について述べる。

第6章：提案する装置単体では1次元運動の画素上移動量みが計測可能であるが、複数個の装置を用いることでさまざまな問題を解決することができる。本章では、そのうちの一つである実移動量を直接計算する構成を提案し、行った

評価実験について述べる.

第 7 章 : 本論文の結論と今後の展望について述べる.

第2章

関連研究

本章では、運動計測を目的とした関連手法を紹介する。前半ではセンサを計測環境に設置する手法（設置型運動計測）について述べ、後半では使用者にセンサを装着する手法（自律型運動計測）について述べる。

2.1 設置型運動計測手法

2.1.1 マーカと撮像機を併用する運動計測手法

Phasespace は市販されているモーションキャプチャの一種で、観測対象に取り付けられたマーカを外部のラインセンサで観測することで対象の位置を計測する。センサは計測環境中に複数台設置され、計測範囲は最大 50m×50m に設定できる。また、リフレッシュレート 960Hz での高速な計測が可能であり、同時に複数のマーカ位置を計測できるため、使用者の身体各所にマーカを取り付けることで全身の動作を高速にキャプチャできる。以上の特徴より、このシステムは予め固定された環境・計測範囲での高速な運動計測において高い効果を上げることができる。しかし、対象がカメラの計測範囲外に出てしまうと運動計測が不可能になるため、広範囲の計測にはカメラ台数の確保が不可欠である。また、計測環境中に障害物があれば、オクルージョンによる誤差を防ぐ必要があるため、通常よりもさらに多くのカメラが必要になる。本体の価格も高価で

あるため，計測範囲の拡大に伴い，必要な予算やカメラ設置・キャリブレーションなど事前の準備が大規模になる．よって，未知環境で高速な運動を計測するのに適した手法ではない．

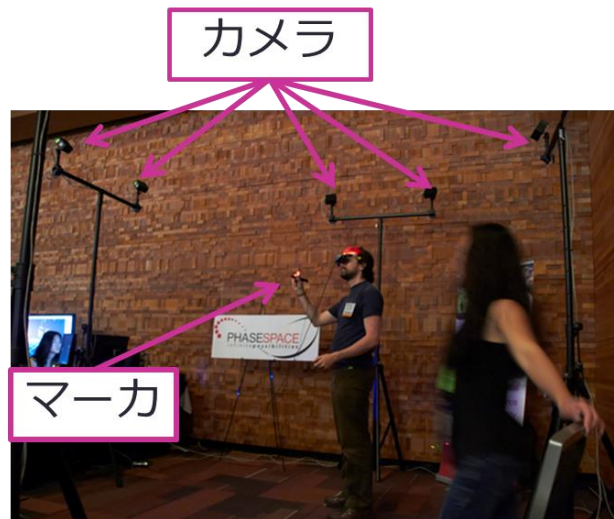


Fig. 2-1 Phasespace を使った計測風景

2.1.2 高速カメラを用いた運動計測手法

横山らは，サッカードミラーと呼ばれるデバイスを用い，カメラによる物体追跡を高速に行うシステムを提案している [12]．カメラ自体の視点移動をカメラ前方に配置された光学系の移動により置き換え，応答性を向上させることで，高速な物体追従を可能としている．使用するカメラのフレームレートは 2kHz と極めて高く，高い時間的分解能を有する．さらに，背景差分によるノイズ除去を利用することで安定した物体追従を可能にしている．しかしながら，光学系が移動できる範囲が限られており，[8]と同様に計測範囲が制限されるため，広範囲にわたる高速な運動を計測することはできない．

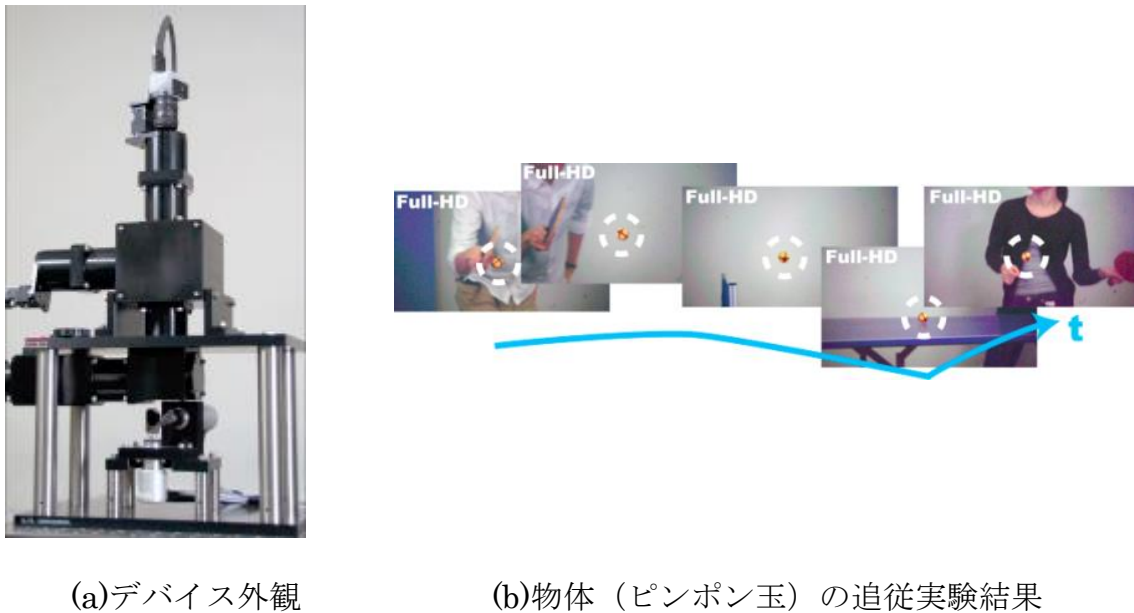


Fig. 2-2 サッカードミラー

2.1.3 赤外線センサを用いた運動計測

HiBall [13]は、観測対象に受光素子を内蔵した小型のセンサを取り付け、室内の天井に多数配置されたLEDの情報からセンサの位置や姿勢を計測するシステムである。取り付けるセンサは500g程度の小型なものであり、使用者の運動への影響が小さい。計測可能な範囲は5.5m×8.5mであり、この部屋の天井には総数約2000個のLEDが配置されている。

このシステムでは対象を高速にトラッキングすることができ、リフレッシュレート2kHzで位置推定が可能である。また、実験では水平位置誤差0.5mm、姿勢誤差0.02°で位置推定可能であった。

このように、このシステムは高速かつ高精度で位置推定可能であるという特徴を持つ。しかし、欠点としてLEDを設置した施設内でしか使用できず、広大

な計測範囲を確保するのは非常に困難であるという点が挙げられる．また計測には赤外線を利用するため，環境光などの外乱が強い屋外で使用することはできない．

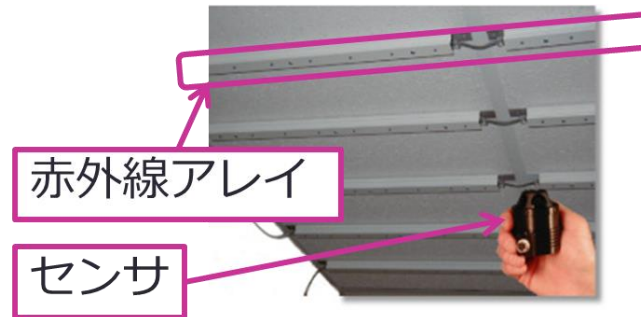


Fig. 2-3 HiBall

2.2 自律型運動計測手法

2.2.1 加速度センサを用いた運動計測手法

Xsens は, 3 軸加速度センサと地磁気センサによって自身の 3 次元位置と姿勢を計測する小型の装置である．センサの大きさは $58 \times 58 \times 33$ mm 程度であり，人間などに取り付けても運動を阻害することがない．また，リフレッシュレートは 2kHz で，外部に特別な機材を設置する必要がないため，高速な運動計測と計測範囲に制限がないという特徴を両立している．しかしながら，移動体内部で運動計測を行った場合，移動体自体の加速度も計測されるため正常に計測が行えない，または大きな誤差が生じることが考えられる．よって，本稿で想定されるような，高速かつ様々な状況が考えられる運動計測は困難である．

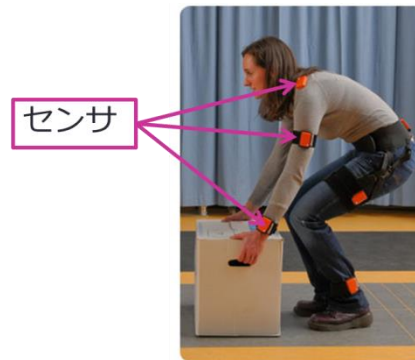


Fig. 2-4 Xsens

2.2.2 市販カメラを用いた運動計測

Shiratori らは、人間の手足関節などにカメラを取り付け、全身の動作をキャプチャするシステムを提案している [10]. それぞれのカメラが計測環境を撮影することで環境の 3 次元形状とカメラ自身の位置を復元する手法 (Structure from Motion, SfM) を用い、使用者の移動・運動等を計測することができる. カメラ移動量の計測には SIFT 特徴量抽出 [14] を用い、フレーム間の対応する特徴量移動を計算することでカメラ自体の移動量を計測する. この手法は、周囲の環境にセンサやマーカを設置する必要がないため、計測範囲や環境に制限されることなく運動計測を行うことができる. 特に、移動量計測に SIFT を用いているため、回転やスケール変化、撮影環境の光量変化に対して頑強で高精度な計測が可能である. また、取り付けるカメラが小型であるため、使用者の運動に与える影響が小さいという利点もある. しかし、使用したカメラのフレームレートは 60Hz であり、高速な運動計測は困難である. さらに、カメラを身体に装着するという制約から使用できる機材が限られるため、フレームレートを改善するためには高価なカメラを身体各所に装着しなければならない. よってこ

の手法は、未知環境にける高速な運動計測には適していない。



Fig. 2-5 システム全体図

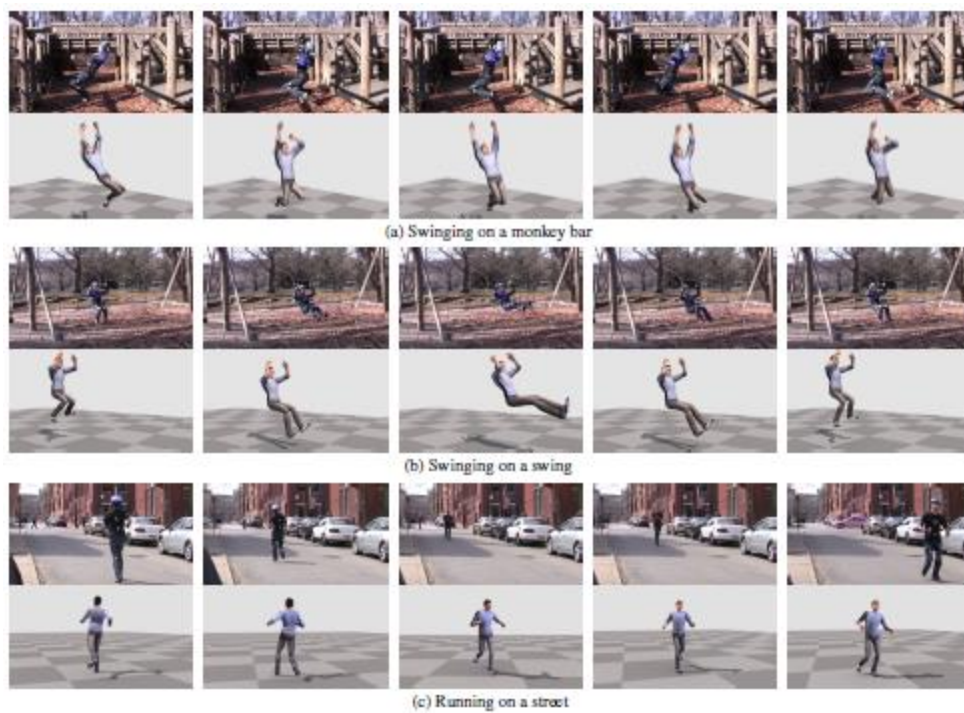


Fig. 2-6 運動計測実験の環境と再現された運動

2.2.3 深度カメラを用いた運動計測

Lui らは、Kinect を利用し、周辺環境を撮影することで取得された深度画像から位置を計測するシステムを提案している [15]。この手法はカメラ複数台を

用いる手法と異なり，単一の装置から得られたデータのみから運動計測が可能である．これにより，複雑な処理を経ることなく計測が行え，計算量の低減が可能である．さらに，Kinect 本体が深度カメラの中では比較的安価で入手できるため，安価で高速な運動計測装置として利用できるという利点がある．

Lui らが行った検証実験では，半径 0.6m の回転台上を 90° 回転させる運動を計測した結果，最小並進誤差 0.03m，最小回転誤差 3.5° であり，計算速度は 28fps であった．このシステムで人間の身体運動を計測することを考えると，Kinect 自体の大きさ，重さは身体に装着するには大型であるため，使用者の身体運動が阻害されることが十分に考えられる(Table 2-1)．また，深度画像を得るために赤外線を用いているため，屋外での使用は非常に困難である．さらに，計算速度は市販カメラと同程度の 28fps であり，高速な運動を計測するのは困難が伴う．よって，冒頭で述べた要件を満たす手法ではない．

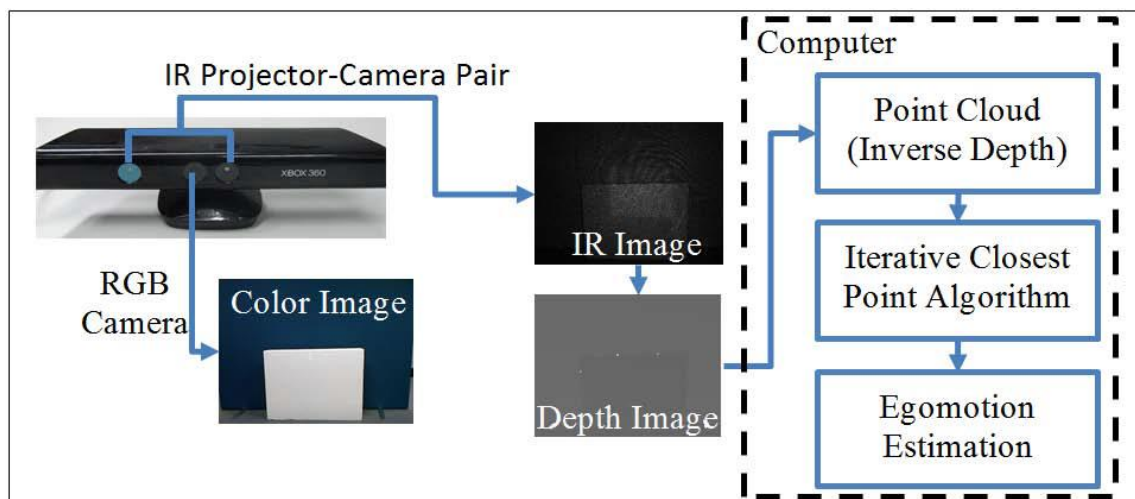


Fig. 2-7 システム構成

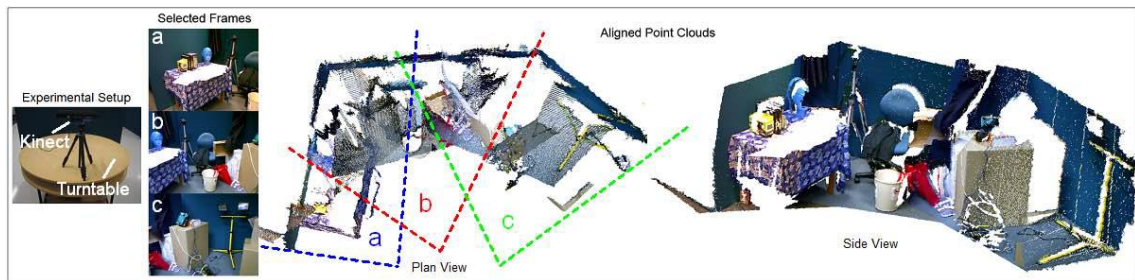


Fig. 2-8 Lui らが行った位置計測実験

Table 2-1 Kinect ハードウェア仕様 [16]

外形寸法	275mm×60mm×80mm
重量	約 600g

2.2.4 深度カメラと加速度センサを併用した運動計測

矢口らは、頭部に深度カメラとして Xtion を装着し、身体各所に加速度センサとして Xsens を装着することで、全身の動作を計測するシステムを提案している。Xtion は Kinect と同じく深度カメラの一種で、Kinect よりも小型軽量であるという利点を持つ。矢口らは、このシステムをロボットへの動作教示の目的で使用している。

このシステムの特徴として、加速度センサを手先など高速な運動が発生しやすい場所に装着することで、高速な運動にも対応しやすくしている点や、既製品を利用して作成されているためデータの扱いが簡単である点などが挙げられる。しかしながら、Xtion を頭部に装着しているため、Kinect 同様身体運動を阻害することが十分に考えられる。また、Xtion は Kinect と同じく深度画像を得るために赤外線を利用しているため、屋外での利用は非常に困難である。よって、この手法も冒頭で挙げた要件を満たす手法ではない。

Table 2-2 Xtion ハードウェア仕様

外形寸法	180mm×35mm×50mm
重量	476g

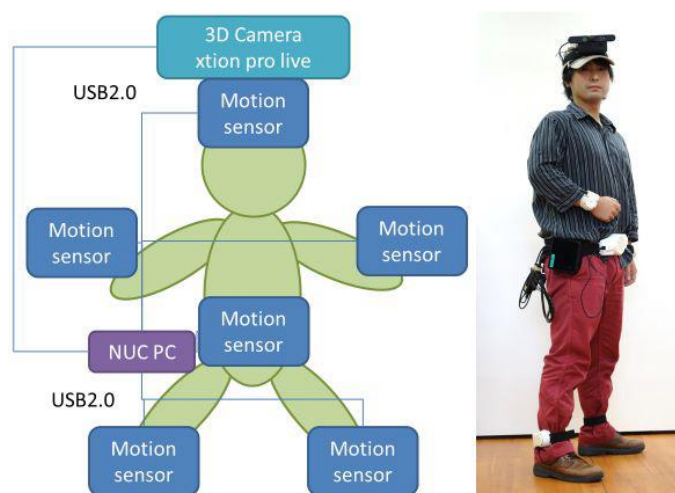


Fig. 2-9 システム模式図(左)とシステム全体図(右)

第3章

提案手法

本章では、提案する手法によって高速な 3 次元運動を計測する方法について述べる．そして、提案手法によって冒頭に挙げた問題を解決可能であることを検証する．

3.1 手法の要件

1.3 節で述べたように、本研究は日常生活からスポーツまであらゆる状況で利用できる運動計測装置の開発を目的としている．そのために満たすべき要件は

- 計測範囲に制限がないこと
- 事前に計測環境の情報を収集する必要がないこと
- 計測環境中にマーカを設置しないこと
- 計測環境自体の運動量から使用者の運動量を切り分けられること
- フレームレートが高く、高速性に優れること
- 身体に装着する装置が小型軽量で、使用者の運動を阻害しないこと

であると述べた．この問題を解決するため、リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いる手法を提案する．この手法は、画像処理を用いた運動計測手法を応用したものである．3.2 節で発端となった運動計測の原理について述べ、

続く節でこの原理をさらに高速化する方法を述べる。

3.2 運動量計算原理

本手法では，撮像素子によって計測環境より得られた輝度情報を一方向に平均化することでデータ量を削減させ，計算量を低減する．輝度情報の平均化により 1 次元の移動量計算に限定されるものの，カメラを利用した従来の運動計測手法より高速に運動を計測することが可能になる．また，本手法はカメラ映像からの単なる輝度変化により運動計測を行う．移動量計算に用いるデータは計測環境に存在する輝度特徴量のみであるため，マーカ設置など事前の準備が必要なく，計測環境に制限されることがない。

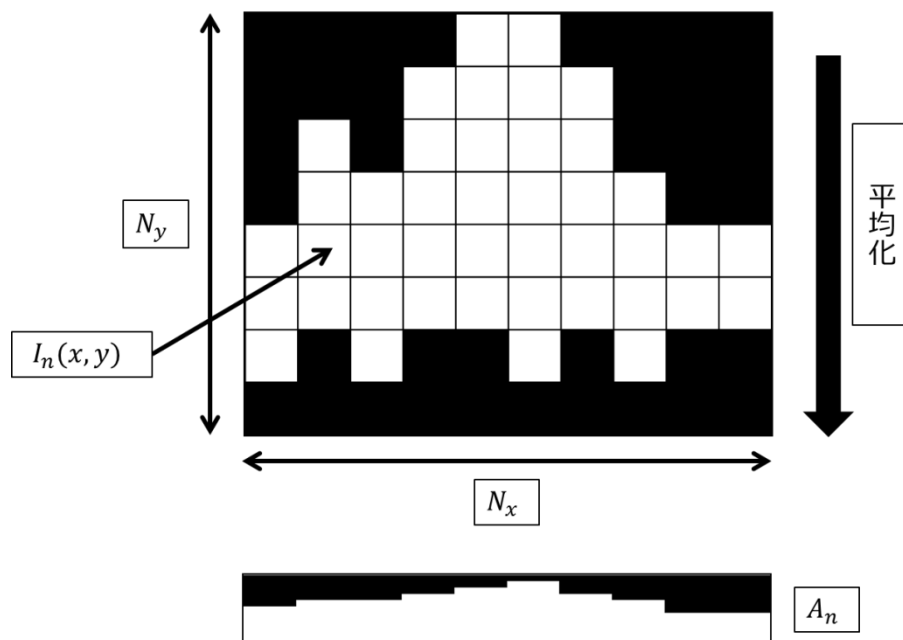


Fig. 3-1 輝度分布と輝度平均

輝度情報の平均化について、次のように考える．

Fig. 3-1 のように、縦、および横のピクセル数が N_x, N_y の画像を考え、 n フレーム目で得られた画像における座標 (x, y) での輝度を $I_n(x, y)$ とおく．ここで、 $I_n(x, y)$ を y 軸方向に加算した値 $A_n(x)$ は式のように表される．また A_n を式以下のように定義する．

$$A_n(x) = \sum_{i=0}^{N_y} I_n(x, i)$$

$$A_n = [A_n(0), A_n(1), \dots, A_n(N_y)] \quad \dots \text{式(1)}$$

次に、 A_n と A_{n-1} との相関 R_n を求める． A_n のずれ量を j 、その相関を $R_n(j)$ とおくと、 $R_n(j)$ は以下のように求められる．

$$R_n(j) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N_x-(j+1)} A_n(i) \cdot A_{n-1}(i-j) & (j \geq 0) \\ R(-j) & (j < 0) \end{cases} \quad \dots \text{式(2)}$$

ただし、 $-N_x \leq j \leq N_x$ である． $R_n(j)$ が最大となるような j を n フレーム目での画像上の移動量とする．

最後に、画像移動量を実世界での移動量に変換する．各パラメータを Table 3-1 のように表せば、変換のための式は次のように表される．

Table 3-1 パラメータ詳細

パラメータ	詳細	単位
T_r	実世界でのカメラ並進移動量	mm
S_p	カメラ素子の大きさ	mm
S_i	画像の撮影範囲	mm
f	焦点距離	mm
D	撮影距離	mm
W	画像のピクセル量	pix
T_i	画像上の移動量	pix

$$T_r = \frac{S_p}{f \times S_i} \times \frac{D}{W} \times T_i \quad \dots \text{式(3)}$$

この原理は一般的な RGB カメラを用い、得られた輝度情報をソフトウェアによって圧縮することが前提となっており、高速な計測を行うためにはハードウェア・ソフトウェア両面から高速化する必要がある。つまり、フレームレートの高速化と計算量の低減が課題となる。

この問題を解決するため、本研究ではこの原理を応用し、リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いる手法を提案する。シリンドリカルレンズによって輝度情報を線状に収束させ、輝度情報の圧縮を光学的に行う。さらに、収束した光をリニア CMOS センサによって読み込ませることで、圧縮された輝度情報を高速で読み取ることが可能である。この詳細を 3.3 節で述べる。

3.3 提案手法の高速化

3.3.1 計算量の低減

本研究の目的は高速な運動計測を実現することであるため、移動量推定のために行う計算は極力少なくしなければならない。提案手法の原理には、画像の輝度情報を一方向に平均化する処理が含まれているが、この処理を計算機で行うと高速性の妨げとなることが考えられる。

そこで、本研究では平凸シリンドリカルレンズを用いることでこの問題を解決する。平凸シリンドリカルレンズは一般的な凹凸レンズとは異なり、ある 1 方向のみの収縮を行う特性を持っている。このレンズで結像した画像をカメラに読み取らせることで、輝度情報の平均化を計算ではなく光学的に行うことができ、計算による処理速度の低下を防ぐことができると考えられる。

3.3.2 フレームレートの高速化

提案手法において高速に運動を計測するためには、輝度情報の取得も高速に行われなければならない。そのため、カメラのフレームレートは非常に重要な問題となる。

そこで本研究では、リニア CMOS センサを使用する。リニア CMOS センサは受光素子が 1 列に並んでおり、縦方向の解像度が 1 のセンサである。このセンサの特徴としてフレームレートが高速であることが挙げられ、中にはビデオレート 35kHz で撮影可能なものも存在する。前述のシリンドリカルレンズで線状に結像させた画像をリニア CMOS センサで読み込ませることで、高速なフレ

ームレートを確保しつつ輝度情報の平均化を光学的に行うことができる。

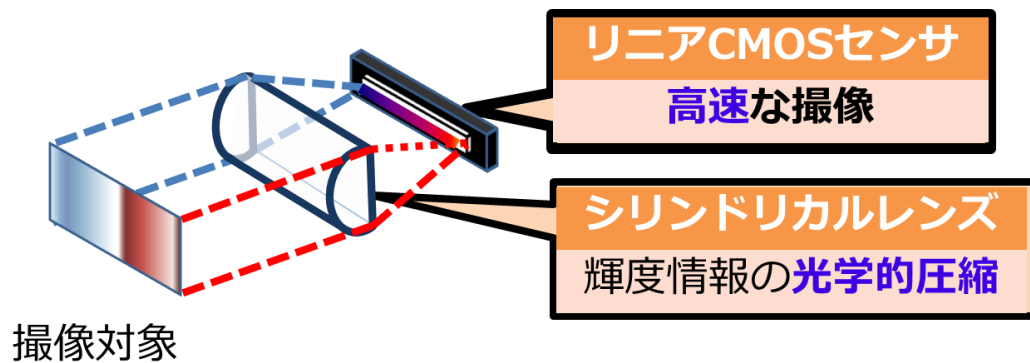


Fig. 3-2 提案手法の模式図

3.4 2次元, 3次元運動の復元

本研究で提案する手法は、極めてフレームレートを得つつ計測範囲の制限を受けずに計測が可能という特長を有している。一方、輝度情報を圧縮し、本来2次元のデータを1次元に落としているため情報量が低下している。これにより、運動計測で得られる情報の次元が1次元に制限されるという問題点も有している。

この問題に対し、加藤らは Fig. 3-3 のようにカメラを複数台用いることで解決を図った。検証実験を通し、この構成によって3次元並進運動・3次元回転運動の計測が可能であることを示している。本手法においても、加藤らが用いた構成のように装置を複数個用いることで2次元・3次元の運動を計測可能であると考えられる。

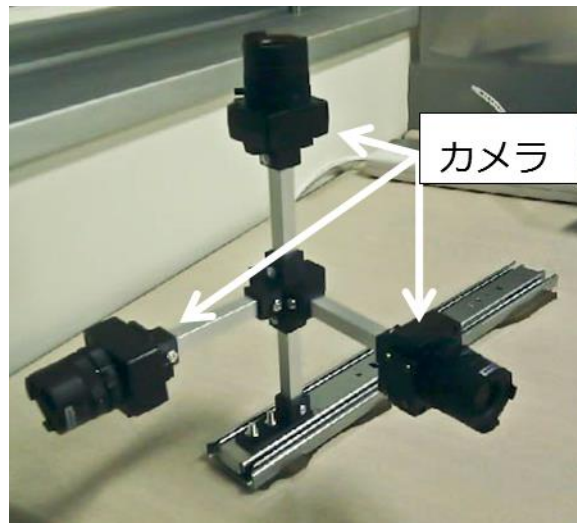


Fig. 3-3 加藤らが使用した 3 次元運動計測装置の構成

3.5 期待される効果

3.5.1 広範囲にわたる運動の計測

提案手法では、センサを身体各所に装着して運動計測を行う。センサを身体に装着することで、設置型計測手法の問題点であった計測範囲に関する問題を解決する。さらに、移動量計測に用いるデータは計測環境中の輝度変化のみであるため、自然な環境のように特徴量が十分存在すれば、マーカを設置せずに運動計測が可能である。以上の特徴より、広範囲にわたる運動の計測が可能であると期待される。

3.5.2 移動体内部での運動計測

移動体内部に存在する特徴量を内部から観測すると，移動体の移動に関わらず不変である．移動体内部より取得した輝度の変化から運動量を推定することで，移動体内部で運動する状況であっても内部の人間の運動のみを計測することができる．

3.5.3 高速な運動の計測

本研究で利用するリニア CMOS センサは，1 次元の撮像を高速で行う特長をもっている．従って，時間的分解能が高い運動計測が可能である．さらに，ハードウェア構成はリニア CMOS センサとシリンドリカルレンズ，スリットのみであるため装置を小型化することが可能である．ソフトウェア構成の利点としては，移動量の計算はフレーム間データの相互相関のみであるため，高速な計算が可能であることが挙げられる．よって，高速な運動計測が可能であることが期待される．

第4章

プロトタイプ設計・評価

本章では，作成したプロトタイプの評価を行う．

4.1 実験目的と評価項目

本システムは，高速かつ広範囲にわたる運動を計測することを目的としている．第 3 章 にてその原理を述べ，目的を達成可能であるとする根拠を述べた．次に，実際に達成可能であるか下記 2 項目を実験することで検証した．

1. 高速性の検証：高速な運動を計測でき，かつ時系列に沿って復元できること
2. 被写体による精度変化の検証：被写体が変化しても，精度に与える影響が少ないこと

4.1.1 節，4.1.2 節でそれぞれの詳細を述べる．

4.1.1 高速性の検証

高速な運動を計測し，時系列に沿って復元するためには，実空間での移動量に比例した画素上移動量が得られることに加え，ハードウェアとソフトウェアの両面から十分な高速化が行われている必要がある．

まず，ハードウェアの高速化を検証する実験として，装置に高速な運動を発生させ，装置移動量を計測する実験を行った．結果を実際の移動量，および加藤らの手法による実験結果と比較することで計測の高速化がはかれているかを検証した．なお，この実験では原理的に精度が悪化する，あるいは計測が困難になる状況を極力回避するため，

- 装置の運動は 1 次元並進運動に制限する
- 被写体は実験用に用意した画像を用い，センサによって読み取る輝度データの変化を顕著にすることで移動量計算を容易にする
- 被写体を実験装置，および実験装置の移動方向と平行に配置する

という制約を課し，理想的な環境で計測を行った．

次に，ソフトウェアの高速化を検証する実験として，AD ボードによるリニア CMOS センサのデータ読み出しから画素上移動量算出までを行うフレームレートを算出し，評価した．今回使用したリニア CMOS センサは，最大 972fps でデータ読み出しが可能である．よって本手法による運動計測も同じく 972fps で行われることが望ましい．本実験では，この数値をソフトウェアの高速化の目標値とし，計算速度が十分に高速であるか検証する実験を行った．

4.1.2 被写体による精度変化の検証

本手法がもつ高速性以外の大きな特徴として，計測範囲に制限がないことも挙げられる．計測対象となる人間とともにセンサが広範囲にわたって移動すれば，計測環境は大きく変化する．つまり，様々な被写体の特徴から移動量を計

測することになる．そのため，被写体の特徴による精度変化が少なければ，様々な環境で計測が可能であることを示すことができる．上記の実験では，理想的な環境を構築するため被写体として実験用の人工画像を用いていた．これと同様の実験を自然環境で行い，精度を比較することで被写体による精度の変化について評価した．

4.2 実験装置

作成した装置の外観写真を Fig. 4-1 に示す．

Fig. 4-1 に示されるように，リニア CMOS センサの前面に平凸シリンドリカルレンズを配置した．なお，平凸シリンドリカルレンズの焦点とリニア CMOS センサの受光素子の並び，および距離が一致するようにこれらを固定した．レンズとセンサの周辺は外部の環境光を受光しないようにカバーで覆った．カバーは 3D プリンタによって作成した．平凸シリンドリカルレンズ前面にはスリットを設置し，ピンホールカメラと同様の原理でセンサに受光させた．リニア CMOS センサへのクロックパルス供給には水晶発振器を使用した．リニア CMOS センサ，水晶発振器への電源供給にはマイコンを用いた．センサより得られた値の PC への取り込みには AD ボードを使用した．AD ボードによる PC へのデータ取り込み，移動量計算を行うプログラムは C++ で記述した．使用した機材を Table 4-1 に示す．機材の特徴や選定理由は 4.2.1 節にて述べる．

Table 4-1 実験で用いた機材一覧

機材名称	詳細
リニア CMOS センサ	浜松ホトニクス S10077
平凸シリンドリカルレンズ	酒井硝子エンジニアリング 00800004
水晶発振器	京セラキンセキ EXO-3
マイコン	Arduino UNO
AD ボード	インターフェース CSI-320110

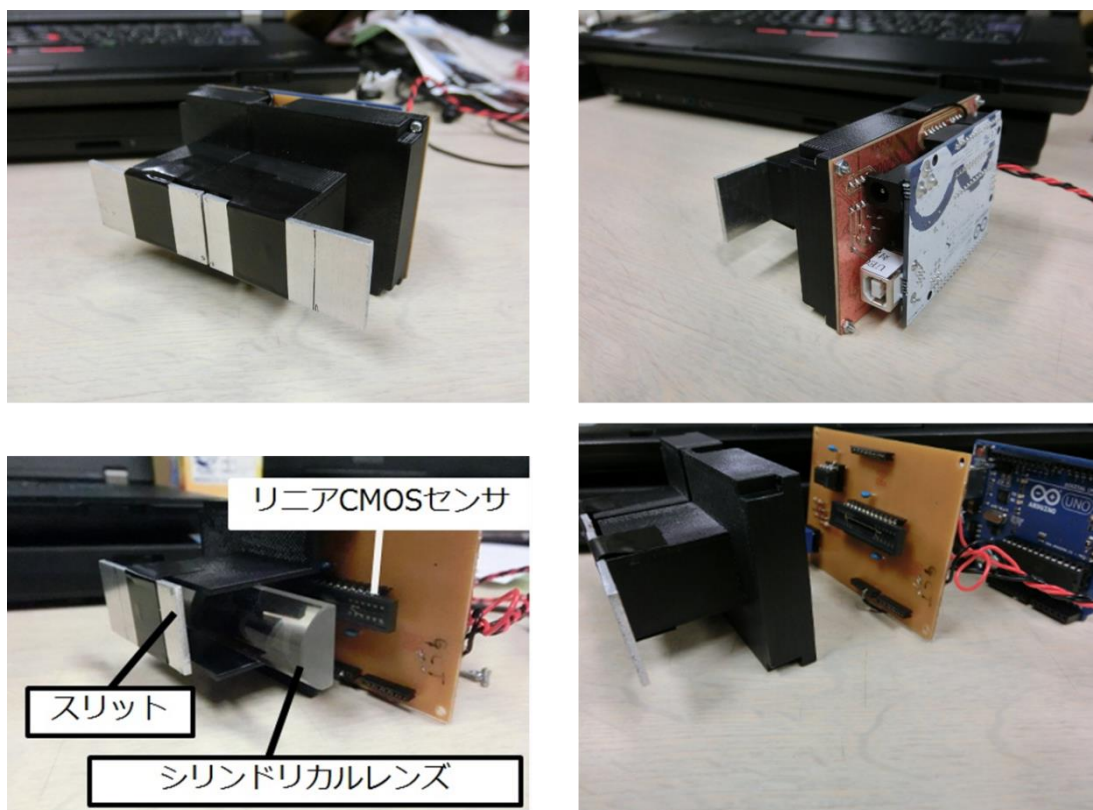


Fig. 4-1 実験装置外観. それぞれ, 左上: 装置前面, 右上: 背面, 左下: 内部, 右下: 部品一覧を示す.

4.2.1 機材詳細

- リニア CMOS センサ

浜松ホトニクス製「S10077」を使用した．このセンサは撮像素子が 1 列に並んだ構造をしており，最大 972Hz の高速なデータ読み出しが可能である．読み出しデータの種類の種類はデジタルとアナログの切り替えが可能である．また，動作に必要な電源は直流 5V，タイミングパルスおよび水晶発振器から発信されるクロックパルスのみであり，タイミングパルスを変更するだけでデータ読み出しレートを調整できるため，回路を簡単に作成できる，制御が容易であるという特長を持つ．さらに，データ出力と同期してトリガ信号と読み出し開始/終了を示す信号が発信されるため，AD ボードによるデータ取り込みが容易に可能である．「S10077」の主な仕様を Table 4-2 に，実物の画像を Fig. 4-2 に示す．

Table 4-2 「S10077」仕様

外形寸法	41.6mm×9.1mm
画素数	1024
画素ピッチ	14μm
受光面長	14.336mm
データ読み出しレート	最大 972Hz



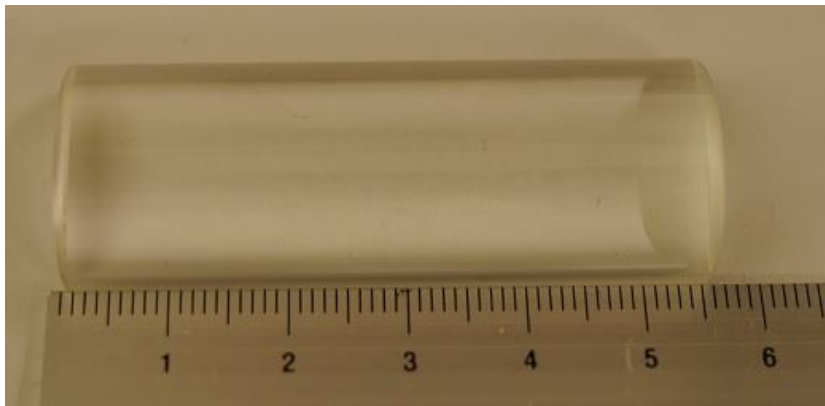
Fig. 4-2 「S10077」画像

- 平凸シリンドリカルレンズ

酒井硝子エンジニアリング製「00800004」を使用した。前節で述べたように、このレンズは一般的な凹レンズや凸レンズと異なり、入射光を直線状に収束させる性質を持つ。本レンズの選定基準は「S10077」の外形寸法とし、「S10077」の寸法を越える最小の規格品とした。「00800004」の主な仕様を Table 4-3 に、実物の画像を Fig. 4-3 に示す。なお、2014 年 1 月 27 日時点で酒井硝子エンジニアリングは廃業しており「00800004」は入手が困難であるため、品種コードも併せて示す。

Table 4-3 「00800004」仕様

品種コード	TS-0603C
外形寸法	20mm×55mm
材質	BK-7
屈折率	1.5168
焦点距離	21.3mm
レンズ背面から焦点までの距離	15mm



(a)正面



(b)右側面

Fig. 4-3 「00800004」画像. (a):正面, (b):右側面を示す.

- マイコン

ATMEL 社製「Arduino UNO」を使用した。「Arduino UNO」は入出力ポートをもつマイコンボードである。プログラム言語は Arduino 独自の言語ではあるが、C 言語と共通する部分が多いため、C 言語の経験者であれば簡単に記述することが可能である。「Arduino UNO」の実物画像を Fig. 4-4 に示す。

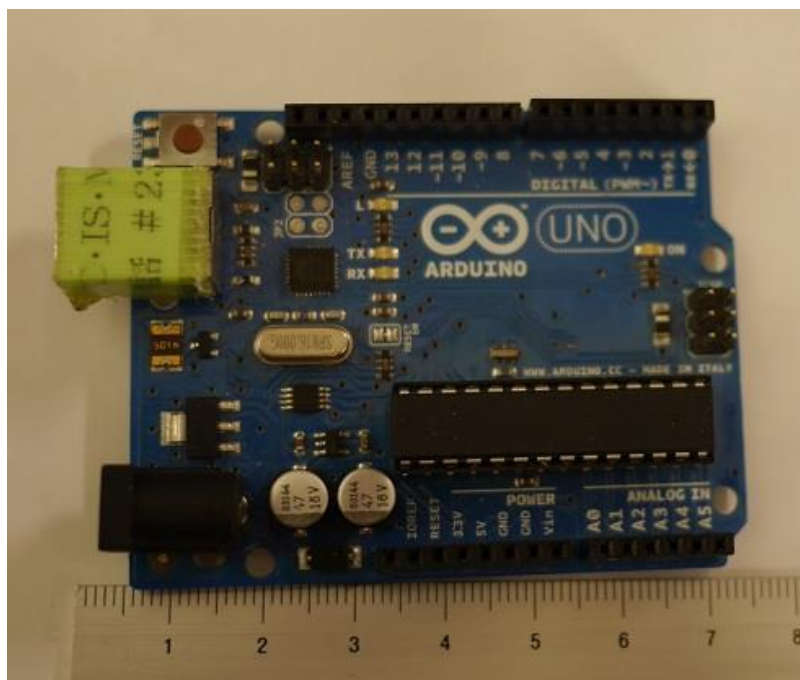


Fig. 4-4 「Arduino UNO」画像

- 水晶発振器

京セラキンセキ製「KCEXO-3」を使用した。「KCEXO-3」は最大 12MHz の発信が可能であり、 $1/2 \sim 1/2^8$ 分周まで対応している。出力する分周波の選択は水晶発振器の端子にかける電圧の組み合わせのみで変更可能であるため、複雑なプログラミングが不要で扱いが容易であるという特長を持つ。「KCEXO-3」の主な仕様を Table 4-4 に示す。

Table 4-4 「KCEXO-3」仕様

原振周波数	12MHz
分周波の周波数	$12 \times (1/2 \sim 1/2^8)\text{MHz}$

- AD ボード

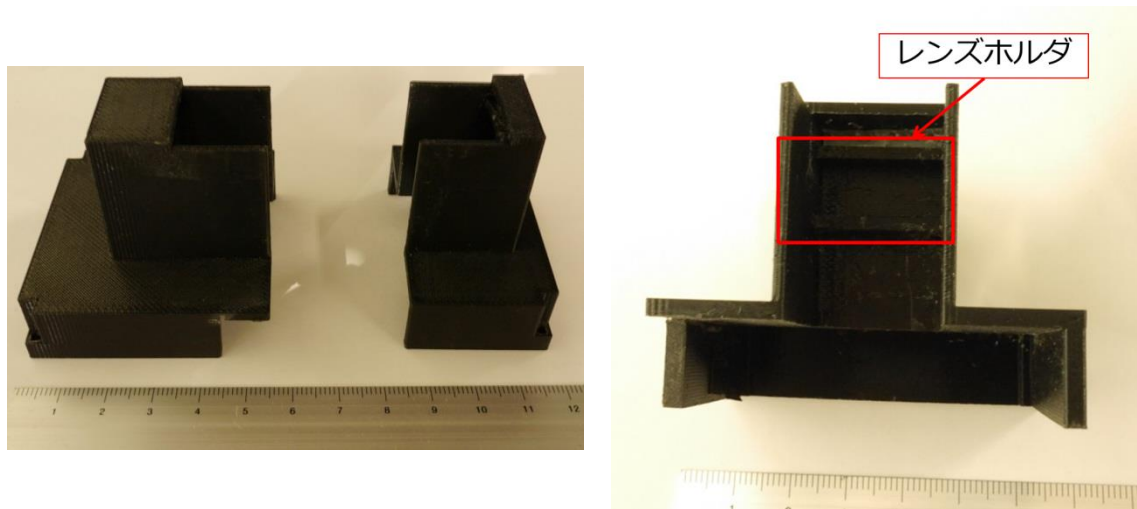
インターフェース社製「CSI-320110」を使用した。「CSI-320110」は同時 2 チャンネル, 最大 40MHz の高速な AD 変換が可能である。サンプリング方式はマルチ ADC 方式を採用しており, チャンネル間遅延が非常に小さい。サンプリングのタイミングはソフトウェアで周期を指定する他に外部トリガの立ち上がり/立ち下がりとすることもでき, 外部機器との同期を容易に取ることができる。「CSI-320110」の主な仕様を Table 4-5 に示す。

Table 4-5 「CSI-320110」仕様

チャンネル数	2
AD 変換方式	マルチ ADC
分解能	10bit
サンプリング周波数	最大 40MHz
サンプリングタイミング	ソフトトリガ, 外部トリガ等選択可

- プロトタイプカバー

3D プリンタで作成したものを使用した。2 つのパーツから構成され, シリンドリカルレンズに入射した光以外を遮断できるように装置周囲を完全に覆う形状をしている。内部にはシリンドリカルレンズを収納・固定するためのマウントが設けられている。実物の画像を Fig. 4-5 に示す。



(a)側面

(b)内部

Fig. 4-5 プロトタイプカバー画像. (a):側面図, (b):内部図を示す.

- 電子回路

市販のプリント基板に電子部品をはんだ付けし，作成した．基板側面にはコネクタがあり，Arduino に上乗せできるようになっている．基板と AD ボードの間には分圧回路を設けた．リニア CMOS センサの最大出力が 5V なのに対し，AD ボードの許容入力電圧が $\pm 1V$ であるため，入力電圧を適宜調整することで AD ボードへの入力電圧が飽和することを防止した．

4.2.2 ソフトウェア詳細

- プログラム言語，ライブラリ

AD 変換や移動量計算を行うプログラムは C++によって記述した．また，AD 変換タイミングの制御や移動量計測結果の視覚化を簡便に行うため，ライブラリとして OpenFrameworks を利用した．C++は処理速度に優れる言語であり，

本研究のように高速な処理が求められる状況に適している。OpenFrameworks はキー入力や描画などの操作を簡単に行うことができる C++ライブラリである。様々なハードウェア・ソフトウェアを扱うためのアドオンが多数用意されており、本来複雑な設定を要求されがちなハードウェア間・ソフトウェア間の連携を容易に行うことができる。本研究においては、計算処理の高速性を維持しつつ、簡単な操作・結果の視覚的な確認が可能という利点をもつ。

- 移動量計算アルゴリズム

マッチング計算を行う方法として、相互相関を利用した。相互相関を用いることで、従来の画像認識で用いられてきた SURF, SIFT といった手法に比べて高速な計算が可能になる。また、ユークリッド距離を用いた最小自乗誤差によるずれ量探索に比べ、外れ値に対する安定性に優れるという利点を持つ。

1 回の相互相関を計算するコストは、画素数を N とすれば $O(3N^2)$ である。今回は最大相関となるずれ量を探索する幅を $\pm N/2$ としているため、1 回の移動量計算で N 回の相関計算が行われる。よって、1 回の移動量計算にかかる計算コストは $O(3N^3)$ である。

- ノイズフィルタリング

本研究ではセンサを高いフレームレートで稼働させるため、ノイズを多く含むデータが出力される。このセンサから出力される電圧は Fig. 4-6 のように不連続であるため、ノイズを電子回路のローパスフィルタで除去することができない。そのため、AD ボードでセンサのデータを取り込んでからソフトウェア処理でノイズ除去を行う必要がある。本研究では、複雑な処理による計算速度の低下を避けるため、以下のように簡単な計算によるフィルタリングを施した。

ノイズフィルタリングの式は以下のように表される.

$$A'_n = \alpha A_{n-1} + (1 - \alpha)A_n$$

ただし

n : 画素番号

A_n : センサから得られた元データ

A'_n : フィルタリング後のデータ

α : フィルタリング係数 ($0 \leq \alpha \leq 1$)

である.

上式で $\alpha = 0.9$ として実際のデータにノイズフィルタリングを施し, 元のデータと比較したグラフを Fig. 4-7 に示す. データ右端では本来のエッジよりやや鈍くなっていることが確認されるが, その他の領域ではノイズが除去され, 輝度値分布も元の形状を保っていることが確認できる.

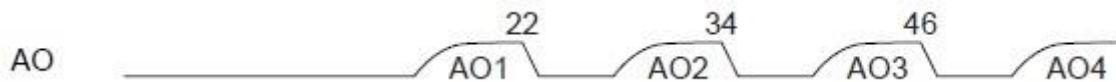


Fig. 4-6 使用したセンサの出力電圧波形. AO1,AO2,・・・は画素1番目,2番目,・・・の出力電圧を示す.

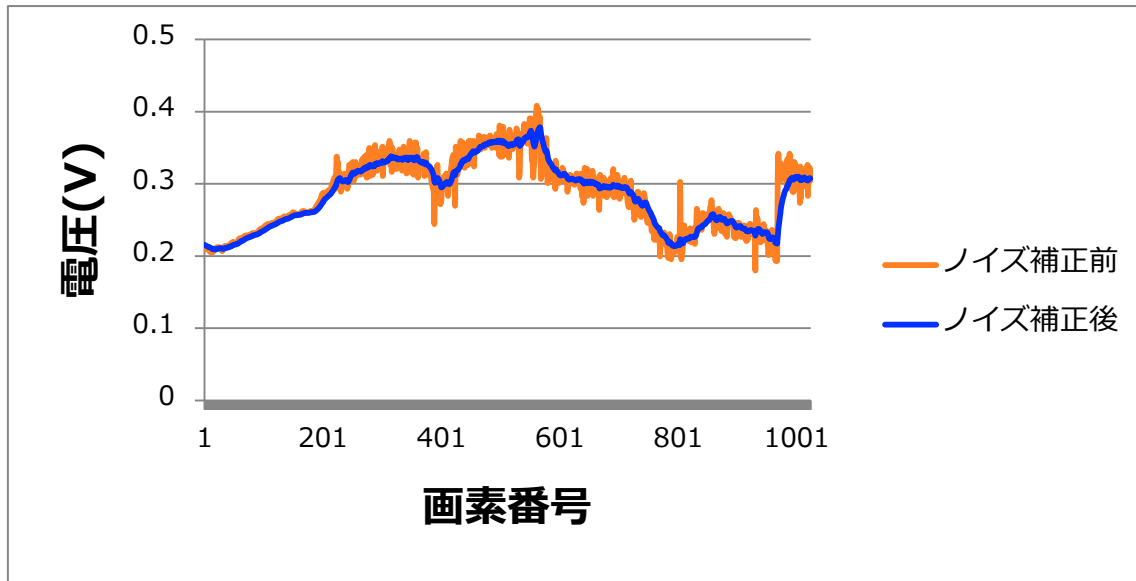


Fig. 4-7 ノイズ補正前後の輝度分布を比較したグラフ

4.3 プロトタイプ評価実験

4.3.1 高速並進運動計測実験

作成した装置を用いて1次元運動の計測実験を行った。装置の運動方向を1方向に制限するため、装置をスライドレールに固定した。実験環境を Fig. 4-8 に、使用したスライドレールと固定された装置の外観および構成の上面図を Fig. 4-9 に示す。なお、被写体として Fig. 4-10 に示すような縦縞の人工画像をセンサと平行になるように配置した。Fig. 4-9 に示されるように、センサと画像の距離は 350mm、実空間で装置が移動する並進距離は 150mm とした。装置の動力として市販の輪ゴムを束ねたものをスライドレールに固定し、ゴムの復元力によって高速な運動を発生させた。後述する移動量観測の結果、並進移動の平均速度は 1.25m/s、最高速度は 2m/s であった。

実験では、装置によって自身の移動量を計算すると同時に、外部からハイスピードカメラ「EX-FC200S」で装置を撮影して実空間の移動量を観測した。移動量観測は、撮影した画像をコマ送りにし、フレーム毎の実験装置の位置を目視で確認することで行った。カメラのフレームレートは 1000fps に設定した。比較対象として、加藤らが用いた USB カメラ「FireflyMV」とレンズ「T0412FICS-3」による手法で同様の実験を行い、結果を比較することで高速性を検証した。

実験装置より得られたフレーム間の画素上移動量と被写体距離を用い、推定移動量を算出した。被写体距離は両手法ともに既知として計算を行った。実験は各 5 回行い、それぞれの平均値と標準偏差を計算した。

実験結果を Fig. 4-11, Fig. 4-12, Table 4-6, Table 4-7 に示す。Fig. 4-11 のグラフでは、提案手法と加藤らの手法より得られた移動量と実際の移動量との比較が時系列ごとにまとめられている。標準偏差に関しては提案手法の結果のみ掲載し、加藤らの手法のものは省略した。加藤らの手法の結果のみを掲載したグラフを Fig. 4-12 に示す。Table 4-6 の表では、並進移動終点までの計算結果を両手法で比較したものを掲載している。Table 4-7 の表では、両手法で発生した誤差を時系列ごとに積算し、平均した値を掲載している。

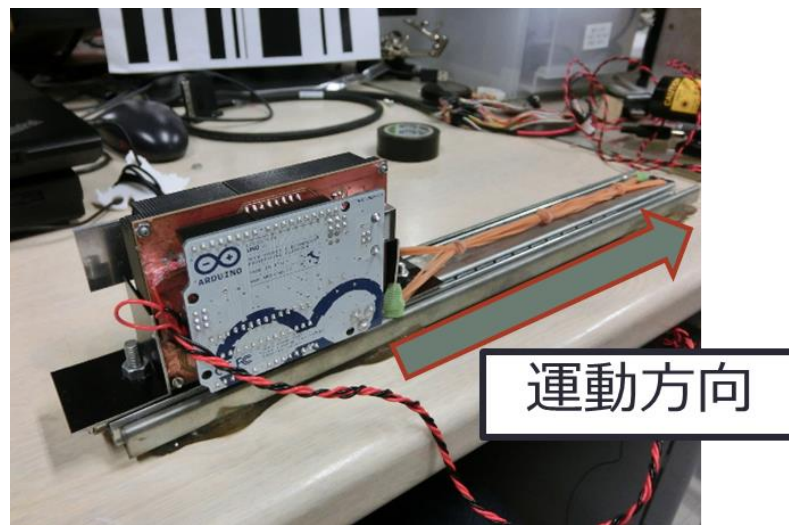


Fig. 4-8 実験環境

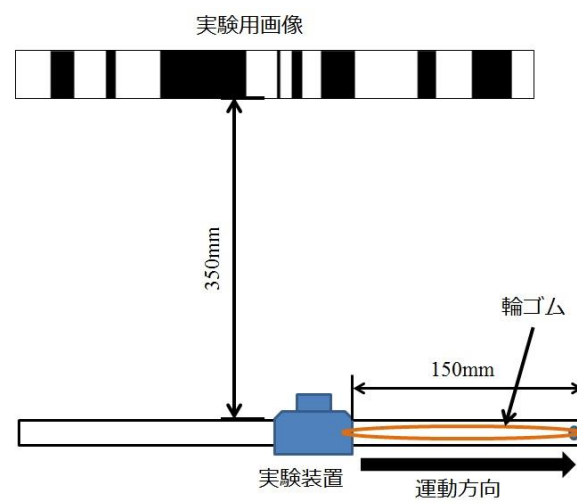


Fig. 4-9 実験環境の模式図

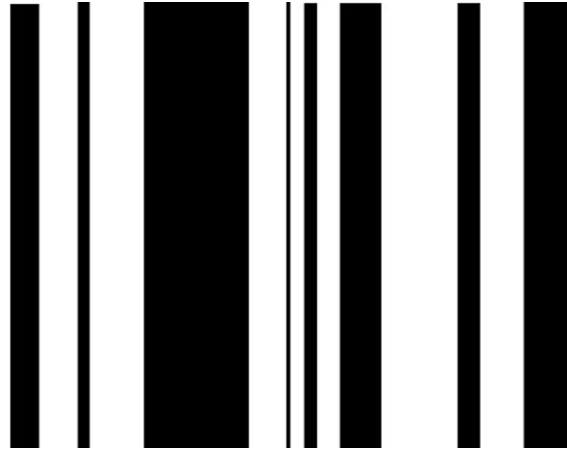


Fig. 4-10 実験で用いた人工画像

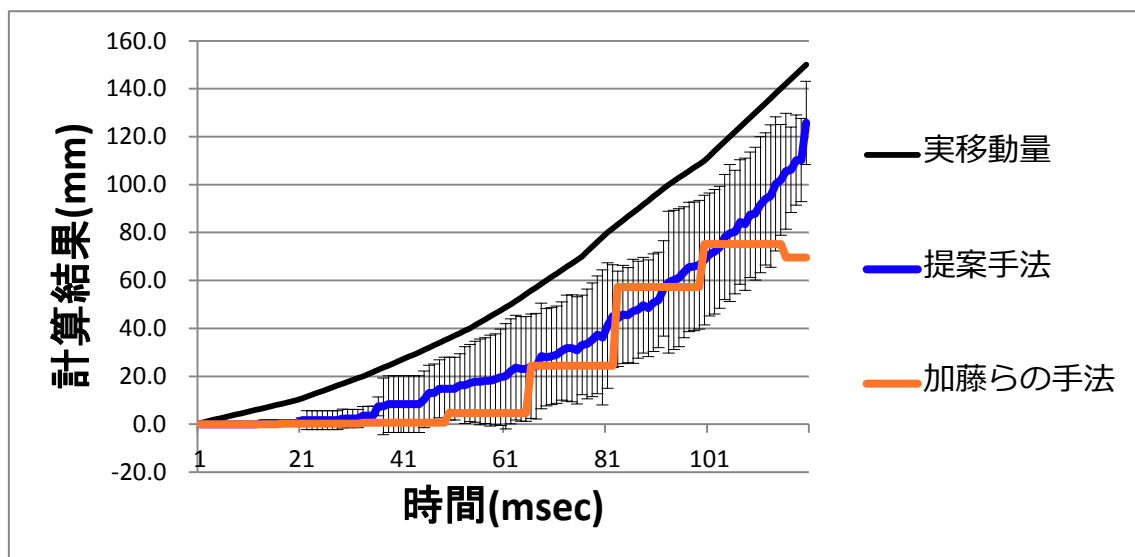


Fig. 4-11 高速並進運動計測結果. 標準偏差は提案手法のもののみ掲載

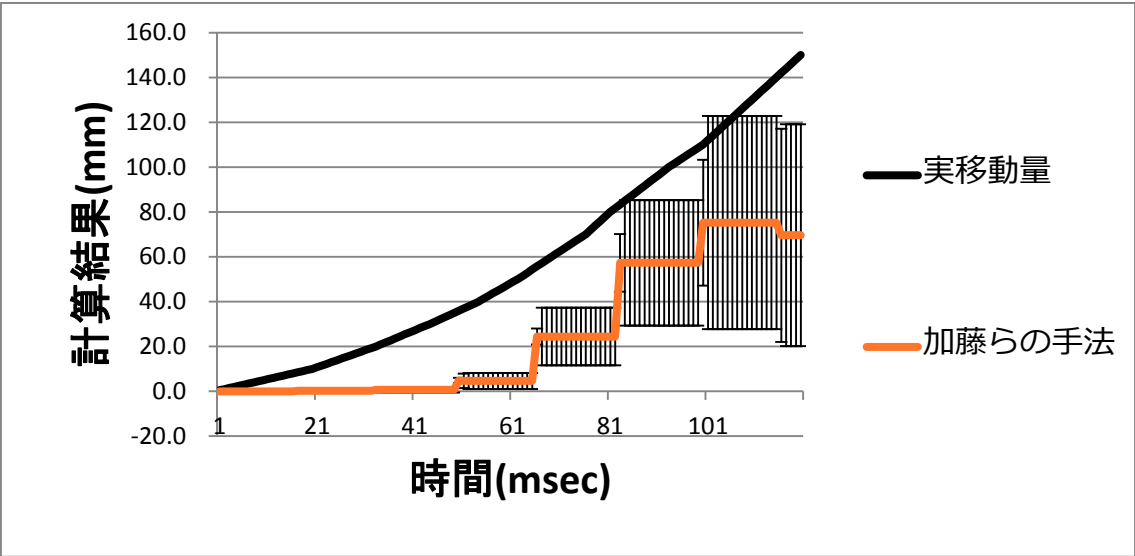


Fig. 4-12 高速並進移動実験結果（加藤らの手法の結果のみ）

Table 4-6 並進運動終点における各手法の計測結果

	1 回目 (mm)	2 回目 (mm)	3 回目 (mm)	4 回目 (mm)	5 回目 (mm)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
提案手法	109.4	130.0	102.7	166.9	119.7	125.74	25.2
加藤らの 手法	52.9	24.9	30.7	97.9	141.8	69.64	49.5

Table 4-7 各手法による計測結果で生じた時系列ごとの RMS 誤差

	RMS 誤差(%)
提案手法	19.5
加藤らの手法	30.1

Fig. 4-11 より、提案手法では高速な運動も時系列に沿って復元できていることが示された。加藤らの手法で用いたカメラのフレームレートが 60fps だったのに対し、提案手法では時間的分解能の上昇により 972fps で計測できたためであるといえる。また、Fig. 4-12, Table 4-6, Table 4-7 より、加藤らの手法と比較して運動計測終点での標準偏差が 51%減少したこと、時系列ごとの RMS 誤差が 10%減少したことより、計測精度・安定性ともに上昇したことが示された。

加藤らの手法で誤差が大きくなった原因として、モーションブラーの発生により輝度分布を正しく取得できなかったことが考えられる。加藤らの手法は市販の USB カメラを使用しているため、フレームレートが 60fps に制限されている。今回計測した並進運動は最大 2m/s、被写体までの距離が 350mm であったことから、1 フレームあたりの画角移動量が最大 5.4° と計算できる。使用したカメラの水平画角は 63.9° であることから、1 フレームあたりおよそ 8.5%の水平画角移動量が発生したことになる。「FireflyMV」の設定では、このような高速な運動に対応できるシャッタースピードを設定することができず、モーションブラーが発生したと考えられる。提案手法ではフレームレートが大幅に上昇し 972fps となったため、1 フレームあたりの画角移動量が最大 0.33° に留まり、安定した輝度分布の取得・移動量計算が行われたことが予想される。

一方、提案手法の計測結果を理論値と比較した場合、時系列ごとに約 20%の誤差が発生していることも示された。この誤差要因として、使用した画像、もしくはプロトタイプの光学系設計、あるいはその両者に問題があることが考えられる。これらを要因とし、小さな移動量が発生しても移動量なしと計算された、大きな移動量が発生しても移動量が小さく計算されたことが誤差につながったと考えられる。4.3.3 節の実験は自然環境を被写体として運動計測実験を行うものであるから、この結果と比較することで誤差要因の判断が容易になると

期待される。

4.3.2 計算速度評価実験

ソフトウェア面から高速化が行われていることを検証する実験を行った。高速化が妨げられていた場合、その原因を切り分けることを考え、PC へのデータ取り込みと移動量計算の 2 過程でフレームレートを計測した。使用した PC のスペックを Table 4-8 に示す。フレームレートの算出は、各処理を 1000 回繰り返し、総経過時間を計測した後平均値を計算することで行った。移動量計算のフレームレートに関しては、一度取得したデータを予めプログラムに読み込ませ、そのデータを使った移動量計算を繰り返すことで、データ取り込みのフレームレートと分離して計算を行った。結果を Table 4-9 に示す。

Table 4-8 使用した PC のスペック

製品名	Lenovo ThinkPad T500
OS	Windows7 Professional 32bit
CPU	Intel Core2 Duo 2.80GHz T9600
メモリ	4GB

Table 4-9 計算速度計測結果

センサの動作速度	データ取得のフレームレート
972fps	480fps
901fps	882fps
	フレームレート
移動量計算	863fps

センサの動作速度を限界である 972fps までフレームレートを上昇させたとき、フレームレートを落とした時よりも逆に処理速度が遅くなり、期待されるフレームレートの半分ほどに低下する現象が確認された。これはサンプリング終了後のデータ読み出しが直後のサンプリング開始までに完了せず、データ取得の周期が半減するためであると考えられる。よって、これは使用した AD ボードに起因する問題であるといえる。この現象は、AD ボードを変更する以外にセンサの動作速度を減少させてサンプリング終了後の読み出し時間を確保するか、データ読み出しタイミングを変更し、全データのサンプリングが終了してからデータを一度に読み出すことで回避できる。

移動量計算の処理速度は 863fps であった。仮に計算部分も別スレッドで動作させた場合でも、データ取得のフレームレートである 972fps より高速でなければフレームレートはそれに伴って減少する。解決方法として、移動量計算プログラムの記述を改善することが第一に挙げられる。

今回移動量計算として導入した相互相関は、パワースペクトルの計算によって代用可能である。パワースペクトルは信号を高速フーリエ変換することで求められ、これを比較する 2 つの信号で計算し、結果を比較することで 2 信号間

のずれ量を計算することができる．高速フーリエ変換の計算コストは，データ数を N とすれば $O(N\log N)$ と表される．これを各データで計算し，それらの積を逆フーリエ変換することで相関関数の計算が可能である．よって，総計算コストは $O(N^2)$ である．今回用いた相関計算の計算コストは $O(3N^3)$ であるから，計算処理を大幅に高速化できることがわかる．

4.3.3 自然環境における計測実験

自然な環境においても同様の精度が保たれるかを検証する実験を行った．実験環境を Fig. 4-13 に示す．4.3.1 節と同様に，実験装置をスラードレールに固定し，実験装置の移動方向を図に示す 1 次元並進運動に制限した．実験装置の被写体は 4.3.1 節の実験とは異なり，Fig. 4-13 に示す自然環境とした．実験は 5 回行い，平均値と標準偏差を算出した．

実験結果を Fig. 4-14, Table 4-10, Table 4-11 に示す．Fig. 4-14 のグラフでは，人工画像を用いた実験結果と自然環境での実験結果，および実際の移動量との比較が時系列ごとにまとめられている．Table 4-10 の表では，並進移動終点までの計算結果を両手法で比較したものを掲載している．Table 4-11 の表では，両手法で発生した誤差を時系列ごとに積算し，平均した値を掲載している．

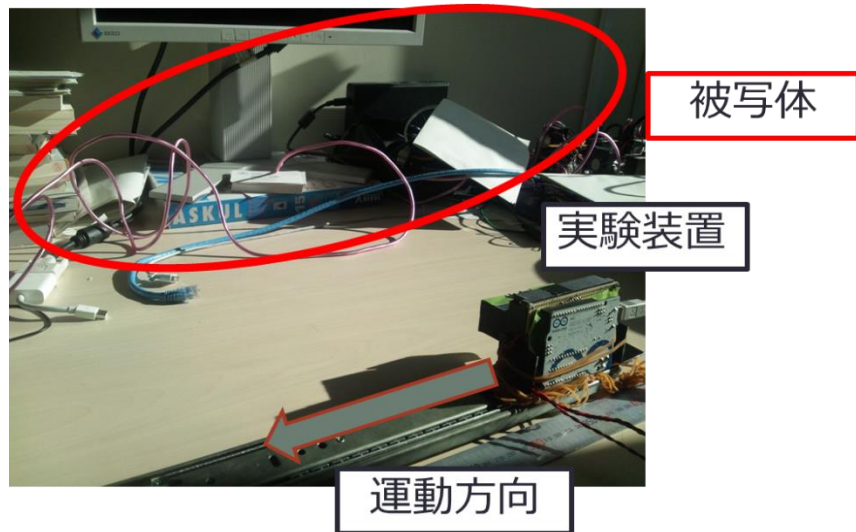


Fig. 4-13 実環境実験の環境

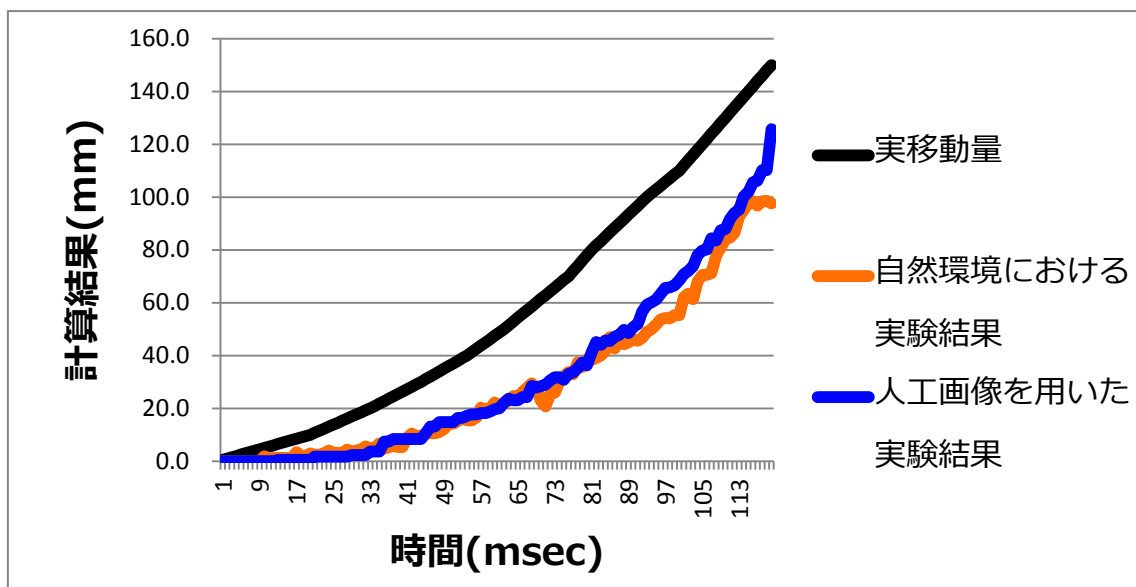


Fig. 4-14 実環境実験結果と画像を用いた実験結果の比較

Table 4-10 並進運動終点における実験結果の比較

	1 回目 (mm)	2 回目 (mm)	3 回目 (mm)	4 回目 (mm)	5 回目 (mm)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
画像を用いた実験結果	109.4	130.0	102.7	166.9	119.7	125.74	25.2
実環境の実験結果	94.6	103.07	74.25	144.65	71.06	97.5	29.6

Table 4-11 時系列ごとの RMS 誤差比較

	時系列ごとの RMS 誤差(%)
画像を用いた実験結果	19.5
実環境実験結果	22.1

Fig. 4-14 より，時系列ごとに復元された結果に大きな差がないことが確認できる．また，Table 4-10 では終点での計測結果におよそ 22.5%の差があるものの，Table 4-11 の結果から，時系列ごとの RMS 誤差は 3%の差に留まったことが示された．この結果から，計測環境による影響が少ない運動計測の可能性が示された．

本実験でも計測誤差が発生していることから，被写体ではなくプロトタイプ構成に誤差要因があることが予想される．この中でも，計測精度に影響を与えた支配的な要素が光学系の設計にあると考えた．提案手法によって移動量を計算する過程は，Fig. 4-15(a)のように表される．このうち相互相関を用いた移動量計算については，加藤らによりこの手法で運動計測が可能であることが検証されているため，それ以外の処理過程に誤差要因があることが予想される．そ

の他の要素はスリット・シリンドリカルレンズもしくはリニア CMOS センサであるが，リニア CMOS センサに起因する誤差は少ないと考えられる．よって，シリンドリカルレンズとスリットに誤差要因があるといえる．シリンドリカルレンズとスリットは，提案手法において輝度情報の撮像範囲と光学的な分解能を決定する要素であり，重要な役割を持っている．これらの要素を検討し，設計を改良することで計測精度を改善できると期待される．

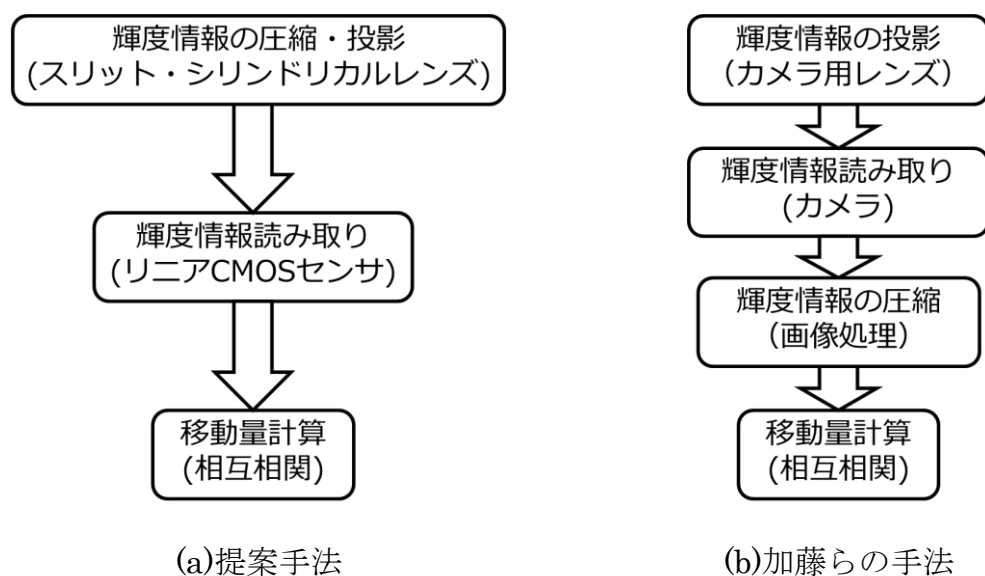


Fig. 4-15 移動量計算までの簡潔な過程

4.4 評価実験の結論

4.4.1 高速性の検証

プロトタイプを用いて行った検証実験より，USB カメラを用いた先行研究による計測よりも時間的分解能が大幅に上昇し，972fps で運動計測が可能になったことが示された．市販の設置型運動計測装置のフレームレートが 960Hz であ

ることから、十分な高速化がなされたといえる。しかしながら、装置のフレームレートに対して計算速度が低いことも同時に示された。これは、移動量計算アルゴリズムを高速なものに置き換えることで解決可能であると考えられる。

4.4.2 被写体による精度変化の検証

人工画像を用いた実験結果と自然環境での実験結果の時系列ごと誤差は 3% であった。これより、計測環境による精度への影響が少ないことが示された。一方、計測誤差自体はどちらも 20%程度発生していることも示された。誤差の原因は光学系設計にあると予想され、設計の改良によって計測精度を改善できることが期待される。

第5章

構成要素の検討

本章では、4.4 節で判明した問題のうち、光学系要素の一つであるスリットに関する設計検討を行う。なお、以降の実験では精度に関する評価のみを行うため、実験装置のフレームレートを 485fps に落とし、良好な S/N 比を確保した状態で実験を行った。

5.1 実験目的と評価項目

本節の目的は、装置構成を変更することで精度がどのように変化するかを検証し、プロトタイプの精度を改善することである。そのために、以下 3 点の評価項目を定めた。

1. 新旧構成による精度変化
2. 被写体距離による精度変化
3. 被写体特徴による精度変化

以下にその詳細を述べる。

5.1.1 構成変更による精度変化

構成変更の目的は運動計測の精度改善であるため、言うまでもなく精度が向

上していなければならない．4.3 節の実験は高速性の検証を優先したため，精度に関する厳密な検証は困難であった．本章の実験では，1 フレーム間の移動距離を逐一設定し，厳密な検証を行う必要がある．

5.1.2 被写体距離による精度変化

4.3 節の実験では，被写体距離は 1 種類のみを設定されていた．しかし，実際の運動計測では被写体距離は多様に変化するため，被写体距離を変化させて精度がどのように変化するかを検証する必要がある．

5.1.3 被写体特徴による精度変化

装置構成を変更し，計測精度が変化したことにより，プロトタイプにはなかった問題が発生することは十分に考えられる．従って，被写体を変化させることで精度が変化するかを再度検証する必要がある．

5.2 スリット設計と計測精度

本節では，構成要素の一つであるスリットがどのような役割を担っているか，またそれが計測精度にどのような影響を与えるか述べる．

5.2.1 センサ-スリット間距離による精度変化

本研究では、リニア CMOS センサに光学的分解能をもたせる目的でスリットを利用している。スリット幅を広げると光学的分解能が低下するため、被写体の特徴をとらえることができず、全体的に平坦なデータが入力される。この状態での移動量計算は最大相関となるずれ量が正しく算出されないため、精度が悪化することが考えられる。一方で、スリット幅を過度に狭めることは入射光を制限することや、S/N 比を低下させることにもなる。従って、スリット幅設計は精度に重要な影響を与える要素であるといえる。

5.2.2 スリット位置による精度変化

スリット位置も計測精度に重要な影響を与える要素である。本研究において、スリット位置は装置の撮像範囲を決定する要素である。撮像範囲の広さは高速な運動に対する安定性につながるため、本研究のように高速な運動を対象とする場合、十分な撮像範囲を確保することが望ましい。しかしながら、スリット位置をセンサに近づけることでレンズへの入射角が鋭くなり、3次元収差が増大する。3次元収差が増大すると撮像範囲が変化し、理想的な状態である長方形ではなく樽型のような形状となることが予想される。この状態では理想的な輝度の圧縮処理が行われないため、計測精度が悪化することが予想される。つまり、スリット位置を決定するためには計測対象が行う高速な運動を計測するのに十分な撮像範囲を確保すること、3次元収差を低減させることが重要であるといえる。

5.3 スリット位置・幅による運動計測精度評価実験

スリット位置・幅が計測精度に与える影響を検証する実験を行った。実験環境を Fig. 5-3 に示す。実験装置をスライドレールに固定し、移動方向を図に示す 1 方向に制限した。装置の被写体として Fig. 4-10 の実験用画像を用い、人為的に被写体の空間周波数を設定した。被写体を Fig. 5-1 に示すカラーボックスに貼り付け、実験装置およびその移動方向と平行になるように配置した。被写体までの距離を 150mm に固定し、実験装置が 1 フレーム間に並進移動する距離を 5mm から 45mm 刻みまで 5mm 刻みで変化させた。実験装置によって算出された画素上移動距離と被写体距離を用い、移動量を推定した。被写体距離は既知として計算を行った。実験は各条件で 20 回行い、平均値と標準偏差を算出した。装置の撮像範囲、およびスリット幅を Table 5-1 のように設定し、それぞれで上記条件の実験を行った。これらの結果を比較し、移動量計測の精度を比較した。以下にスリットの設定と被写体に関する詳細を示す。

- スリット設定

本実験では、スリットの位置をシリンドリカルレンズの前面と背面の 2 種類に関して検証した（それぞれ、前方スリット、後方スリットとする）。スリット幅の設計は、前方スリット、幅 5mm を基準幅とし、これと角度あたりの分解能が等しいものを後方スリットの基準幅とした。それぞれの基準幅から $\pm 1\text{mm}$ 変化させたものを検証実験の対象とした。

- 被写体の設定

今回の実験は装置構成による精度変化の検証が目的であるため、計測そのものに対する雑音は極力少ないことが望ましい。特に、被写体の輝度分布は計測精度に大きな影響を与える要素である。そのため、実験用画像を用いて実験を行った。この画像はエッジがはっきりしており、被写体の輝度変化が鮮明である。これを実験装置と平行に配置した平面に重ねることにより、本手法では計測が困難になる状況、つまり被写体の輝度分布が一様、もしくは正弦波のように規則的な分布になる、撮像範囲内に被写体距離の異なる物体が混在する、といった状況を回避することができる。



Fig. 5-1 カラーボックス



Fig. 5-2 カラーボックスに人工画像を貼りつけた状態

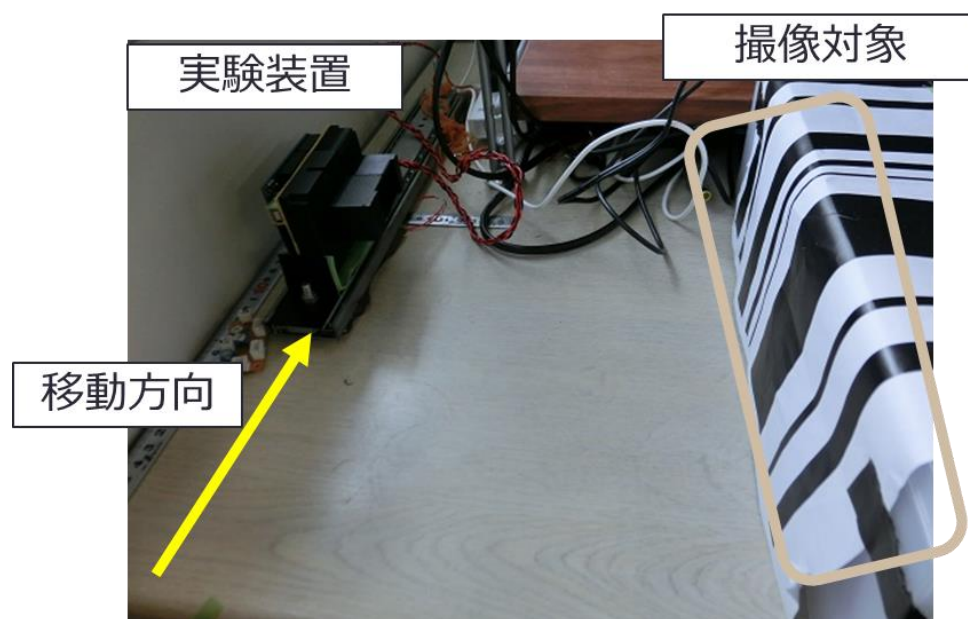


Fig. 5-3 スリット位置・幅検証実験の実験環境

Table 5-1 スリット位置・幅の組み合わせ

	センサ-スリット間 距離(mm)	スリット幅 (mm)	光学的分解能 (deg)
前方-4mm	38	4	6.0
前方-5mm	38	5	7.5
前方-6mm	38	6	9.0
後方-1mm	15	1	3.8
後方-2mm	15	2	7.6
後方-3mm	15	3	11.3

結果を Table 5-2, Table 5-3, Fig. 5-4, Fig. 5-5 に示す. Table 5-2, Table 5-3 では, 各 20 回計測した結果の平均値と標準偏差が示されている. Fig. 5-4 では, 実際の移動距離と装置によって計算された移動距離の関係を前方スリットの結果に限定して示す. Fig. 5-5 では, 同じものを後方スリットの結果に限定して示す.

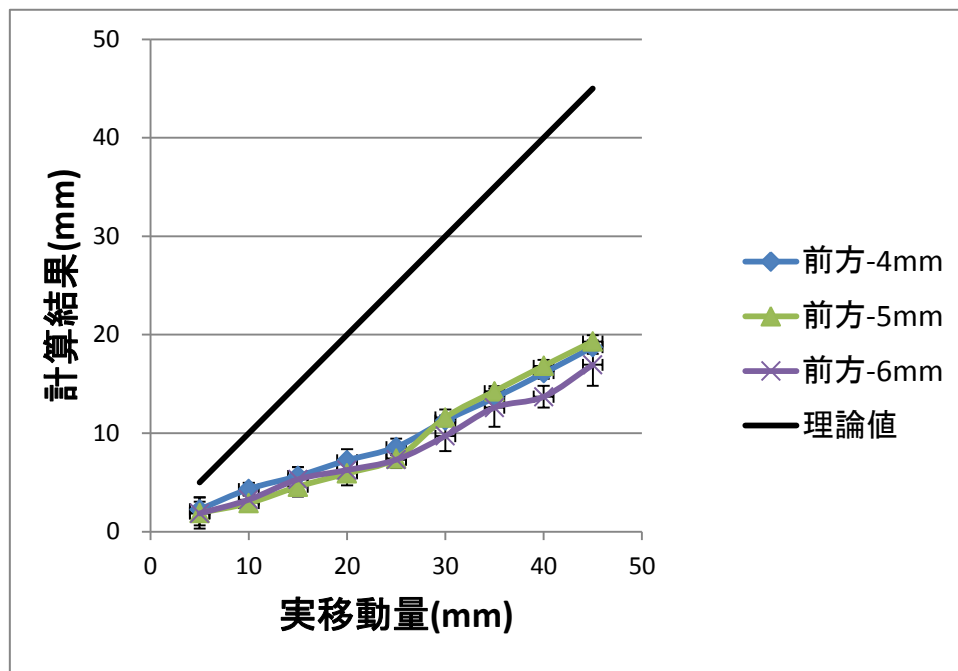


Fig. 5-4 並進運動計測結果（前方スリットのみ）

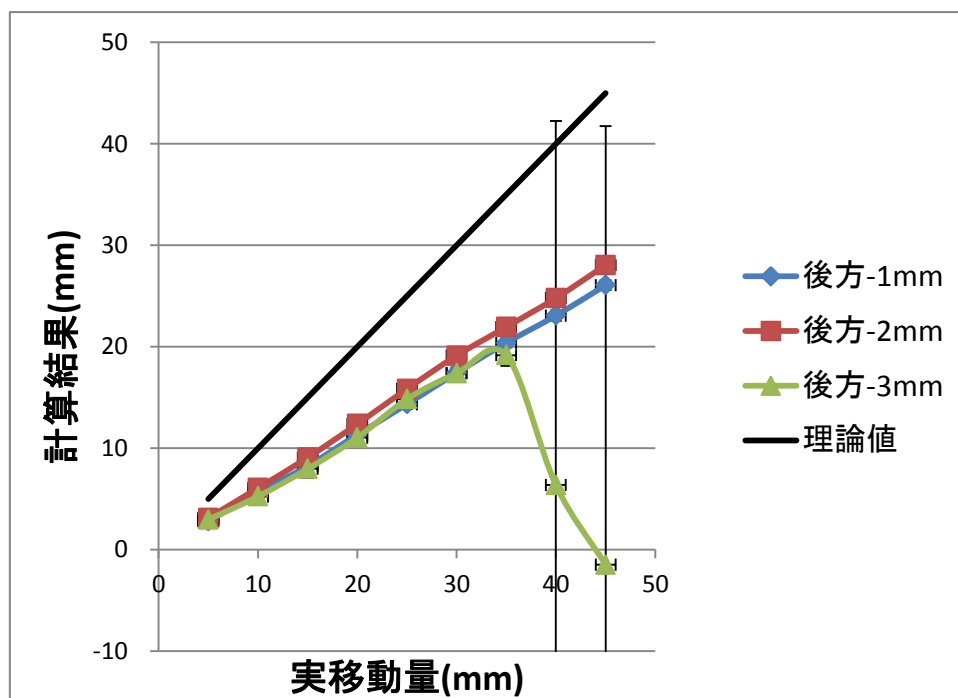


Fig. 5-5 並進運動計測結果（後方スリットのみ）

Table 5-2, Table 5-3 から，多くの領域で前方にスリットを置いた構成よりも

後方に置いた構成のほうが良好な精度を得られることが示された。また，Fig. 5-4, Fig. 5-5 から，後方にスリットを置いた構成のほうが移動距離と計測結果の間により良好な比例関係が得られることも示された。以降では，後方スリットの計測結果について考察を行う。

- スリット幅 1mm とスリット幅 2mm の計測結果の比較

スリット幅 1mm とスリット幅 2mm の結果を比較すると，移動距離 20mm 以降ではスリット幅 2mm の結果が 1mm の結果を 10%程度上回っていることが示された。実際に移動させた距離の誤差が支配的な原因であると仮定した場合，実移動量に換算すれば数 mm のオーダーで移動量操作ミスが発生していたことになる。しかし，両者とも結果の標準偏差が非常に小さいため，人為的な操作ミスが発生し続けた可能性は極めて低い。この原因は，スリット幅を狭めた結果，光学的分解能の向上より全体的な光量低下の影響が大きくなったことであると考えられる。スリット幅 1mm と 2mm で得られた輝度値分布を比較したグラフを Fig. 5-6 に示す。スリット幅 2mm では AD ボードの入力許容電圧である 1V を超えてしまったため，分圧比を調整して AD ボードに入力してある。両者を比較すると，スリット幅 2mm では画素番号 300 番～500 番にみられる被写体特徴を撮像することができたが，スリット幅 1mm ではこれが失われていることがわかる。これは光量が低下した結果，本来撮像されるはずの被写体の特徴が失われるか，ノイズと混同されたことが原因であると考えられる。このことから，スリット幅を過度に狭めたことで，空間的分解能の向上よりも光量低下により特徴量が失われる効果が大きくなり，計測精度が悪化したといえる。

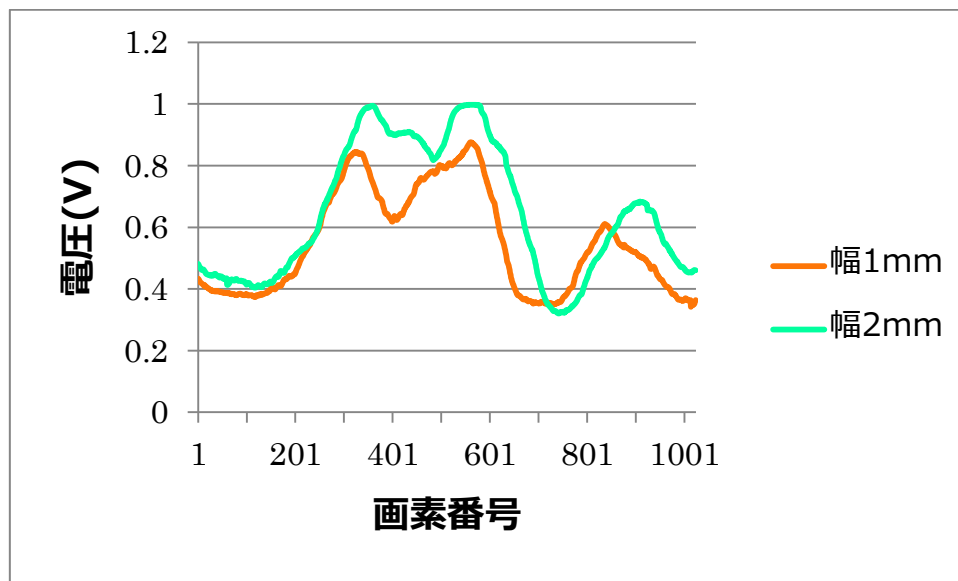


Fig. 5-6 スリット幅 1mm と 2mm で得られた輝度値分布の比較

- スリット幅 3mm での計測結果

Table 5-3 の後方スリット・幅 3mm の結果において、移動距離 40mm と 45mm では計測精度が極めて低く、標準偏差が非常に大きくなる傾向がみられる。これは、今回実験を行ったスリット設定の中で光学的分解能が最も低い設定であることが原因であると考えられる。後方スリット・幅 3mm と後方スリット・幅 1mm の実験装置を同じ計測位置に配置し、得られた輝度値分布を比較したグラフを Fig. 5-7 に、両設定で移動距離 45mm を計測した際の結果 10 回分を比較した表を Table 5-4 に示す。Table 5-4 では、最大相関となるずれ量の計算に失敗したと考えられる箇所については赤字で示してある。Fig. 5-7 で両者を比較すると、特に画素番号 100 番～400 番付近で被写体の特徴が失われている様子が顕著に表れている。このデータを基に計算された移動量が Table 5-4 である。両者の結果を比較すると、幅 3mm の結果においてのみ移動量が負に計算される現象が起きている。さらに、移動量が正しい方向に計算されたときでも、幅 1mm の結果より移動量が少なく計算されていることがわかる。このことから、光学

的分解能が低下したことにより，高速な運動の計測精度と安定性が低下したといえる．

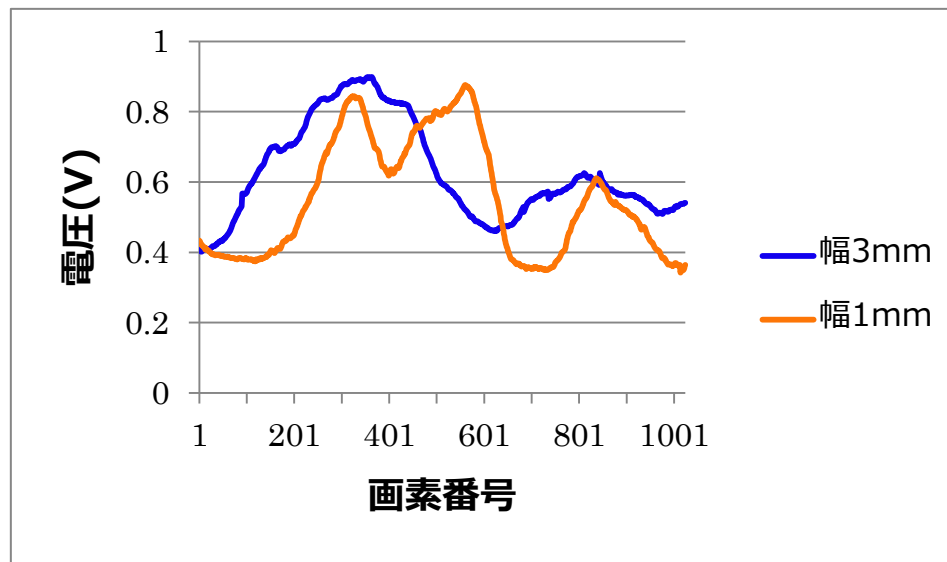


Fig. 5-7 スリット幅 3mm と 1mm で得られた輝度値分布の比較

Table 5-4 移動量 45mm の計測結果(10 回分)．移動量計算に失敗したと考えられる箇所は，赤字で示してある．

スリット設定	画素上移動量の計測結果(pix)				
後方-3mm	-393	-395	164	162	150
	147	140	-394	128	128
後方-1mm	171	171	169	168	169
	164	166	171	173	165

5.4 検証実験より得られた装置の改良方針

5.3 節で行った撮像範囲と光学的分解能に関する検証実験より，装置構成の改善方針を得ることができた．スリット位置に関しては，後方に移動させることで精度向上が可能であることが示された．そしてスリット幅に関しては，幅 1mm では得られる光量の低下により計測精度が悪化すること，幅 3mm では光学的分解能の低下により高速な運動の計測精度が悪化することから，幅 2mm の設計が適切であることが示された．この結論をもとに，本章の以降の節では装置構成の改良を行う．

5.5 装置構成の改良

5.3 節の結果をもとに実験装置の構成を改良した．従来の設計と今回の設計を比較した模式図を Fig. 5-8 に示す．今回提案する装置では，従来レンズの前方に配置されていたスリットをレンズ後方に移動させ，センサ・スリット間の寸法を従来設計よりも短くした．また，スリット幅を 6mm から 2mm に変更した．さらに，一部設計を精査し，センサ・レンズ間に生じていた微小な設計誤差を解消した．スリット位置の変更により横方向の輝度取得範囲が増大し，スリット幅調整によって空間的分解能を向上させた．また，レンズ・センサ間寸法を調整し，微小な設計誤差を解消することで，従来よりも縦方向の輝度取得範囲を拡大させた．これらの改善によって従来の設計よりも広域な輝度情報を高精度で取得することが可能になると期待される．

実際に作成した装置の外観写真を Fig. 5-9 に示す．図に示されるように，リ

ニア CMOS センサの前面にシリンドリカルレンズを配置した。なお、シリンドリカルレンズの焦点とリニア CMOS センサの受光素子の並び、および距離が一致するようにこれらを固定した。レンズとセンサの周辺は外部の環境光を受光しないようにカバーで覆った。カバーはプロトタイプと同様に 3D プリンタで作成した。レンズ裏面にはスリットを配置し、ピンホールカメラと同様の原理でセンサに受光させた。使用した機材一覧を Table 5-5 に示す。機材については旧構成と同じものを使用しているため、本節ではこれらの詳細は割愛する。カバーは構成変更によって設計が変更されたため、この詳細を述べる。

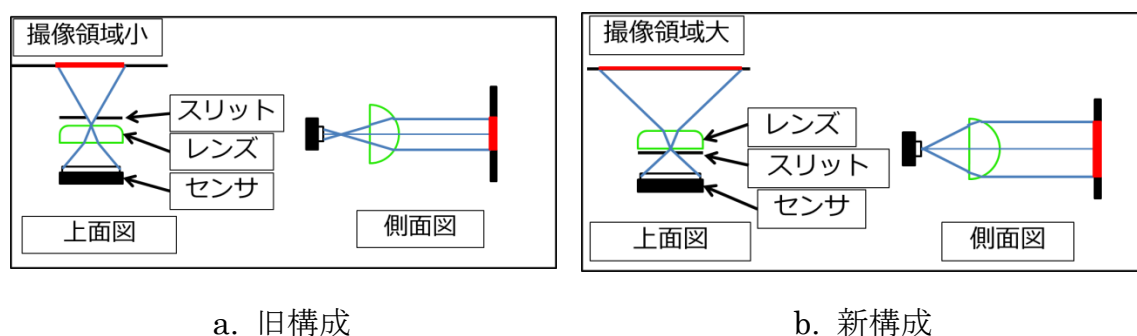
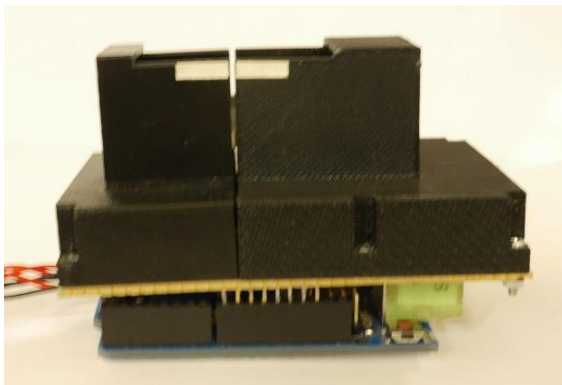


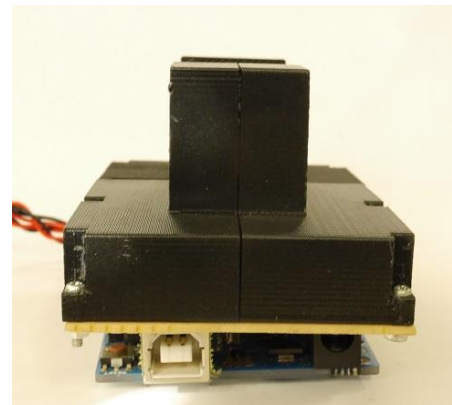
Fig. 5-8 新旧実験装置構成の模式図。a:旧装置の構成，b:新装置の構成 を示す。



(a):正面



(b):側面



(c):右側面

Fig. 5-9 作成した新装置画像. (a):正面, (b):側面, (c):右側面を示す.

Table 5-5 新構成で使用した機材一覧

機材名称	詳細
リニア CMOS センサ	浜松ホトニクス S10077
平凸シリンドリカルレンズ	酒井硝子エンジニアリング 00800004
水晶発振器	京セラキンセキ EXO-3
マイコン	Arduino UNO
AD ボード	インターフェース CSI-320110

- カバー

装置カバーはプロトタイプカバーと同様に 3D プリンタで作成した。画像を Fig. 5-10 に示す。旧構成の設計を精査した結果、センサ・レンズ間に設計誤差があることが判明したため、これを解消すると同時に Fig. 5-11 に示すようなセンサマウントを追加した。従来の構成では設計誤差に加え、センサ・レンズ間距離の拘束はカバー・プリント基板・コネクタを介して行われていた。今回センサマウントを追加したことで、センサ・レンズ間の拘束をカバーのみを介して行うことができる。

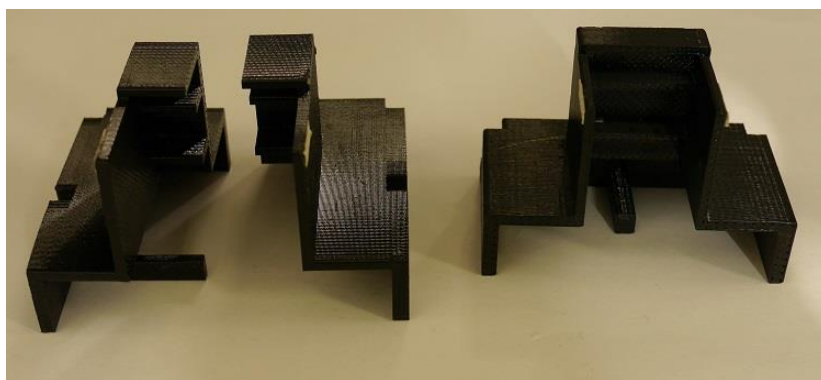


Fig. 5-10 新構成カバー

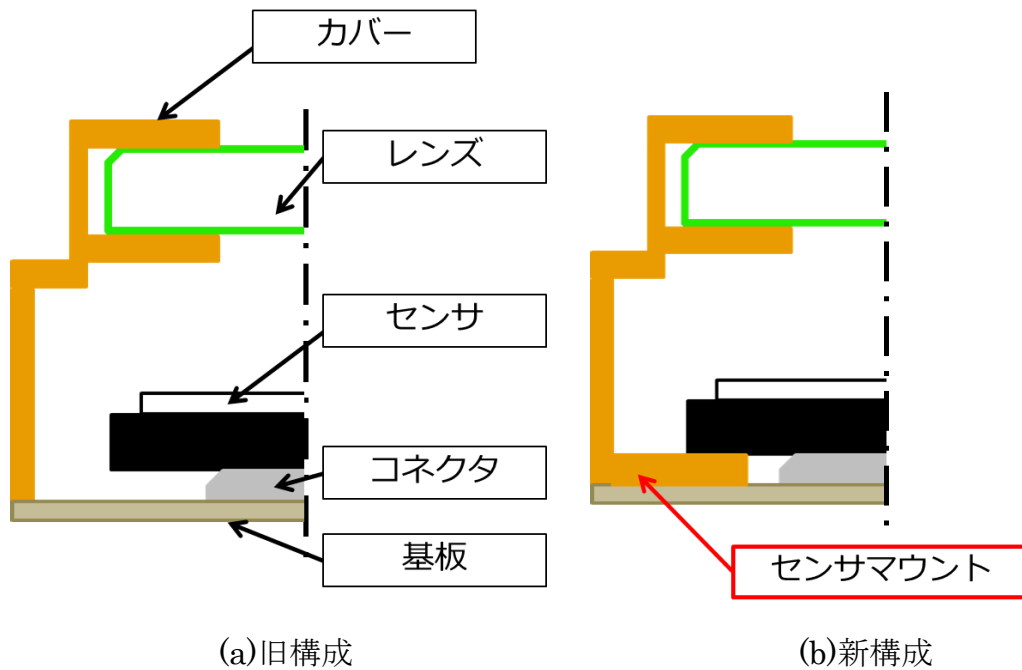


Fig. 5-11 新旧構成におけるカバー模式図の比較

5.6 自然環境における計測精度比較実験

5.3 節の実験より、理想的な環境での計測結果を改善する構成が示された。プロトタイプを使用した実験では、4.3.3 節の結果から計測環境による精度変化が少ないことが示されている。しかし、構成変更によってプロトタイプでは判明しなかった問題点が発見されることは十分に考えられる。これを調査するため、新旧両装置で実環境における 1 次元並進運動の計測実験を行い、精度がどのように変化したか確認する実験を行った。

実験環境を Fig. 5-12 に示す。実験装置をスライドレールに固定し、装置の移動方向を図で示す 1 方向に制限した。装置が移動しても被写体までの距離を一定に保てるように、被写体となる環境は実験装置と平行に配置した。被写体として室内の書籍を利用した。実験装置と被写体の距離を 150mm, 200mm,

250mm, 300mm の 4 種類, 1 フレーム間の装置移動量を 5mm から 50mm まで 5mm 刻みに変化させた。移動量計測は各 20 回行い, 平均値と標準偏差を算出した。得られた移動ピクセル量と被写体距離から移動量を計算し, 実移動量と比較した。被写体距離は既知として計算を行った。

実験結果を Fig. 5-13～Fig. 5-16 に示す。Fig. 5-13～Fig. 5-16 のグラフでは, 新旧実験装置より得られた移動量と実際の移動量が構成ごとにまとめられている。結果の標準偏差は新構成のみ掲載し, 旧構成の標準偏差は省略した。

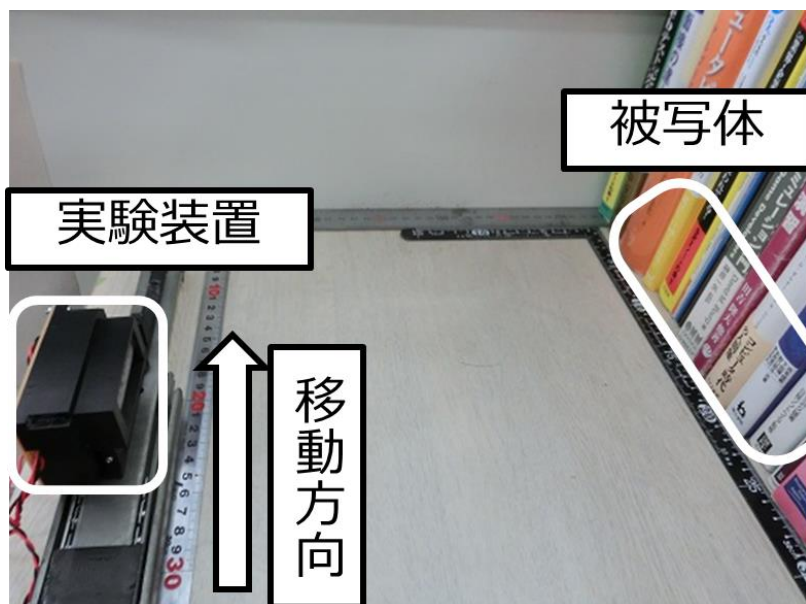


Fig. 5-12 実験環境

Table 5-6 被写体距離 150mm における実験結果

実移動量(mm)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
新構成	計算結果(mm)	4	10	12	15	16	14	12	13	15	17
	標準偏差(mm)	3	2	5	6	6	9	8	7	5	6
旧構成	計算結果(mm)	0	3	6	11	13	16	12	10	6	1
	標準偏差(mm)	3	2	3	2	1	1	8	8	9	2

Table 5-7 被写体距離 200mm における実験結果

実移動量(mm)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
新構成	計算結果(mm)	5	10	15	17	17	24	24	30	35	30
	標準偏差(mm)	3	2	3	4	9	5	8	2	3	5
旧構成	計算結果(mm)	0	3	3	8	10	2	4	4	4	6
	標準偏差(mm)	1	3	4	7	11	3	3	5	5	7

Table 5-8 被写体距離 250mm における実験結果

実移動量(mm)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
新構成	計算結果(mm)	4	10	13	21	23	29	33	36	41	43
	標準偏差(mm)	3	1	4	6	3	4	4	3	2	4
旧構成	計算結果(mm)	4	5	6	7	4	19	5	1	2	4
	標準偏差(mm)	10	6	10	7	7	18	8	2	2	7

Table 5-9 被写体距離 300mm における実験結果

実移動量(mm)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
新構成	計算結果(mm)	4	10	17	29	30	28	33	40	44	46
	標準偏差(mm)	3	3	18	24	18	12	5	4	3	3
旧構成	計算結果(mm)	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1
	標準偏差(mm)	1	3	3	3	1	1	1	1	2	2

Table 5-10 計測結果の RMS 誤差(構成ごとに提示)

被写体距離(mm)	150	200	250	300
旧構成 RMS 誤差(%)	71	82	83	92
新構成 RMS 誤差(%)	49	23	10	17

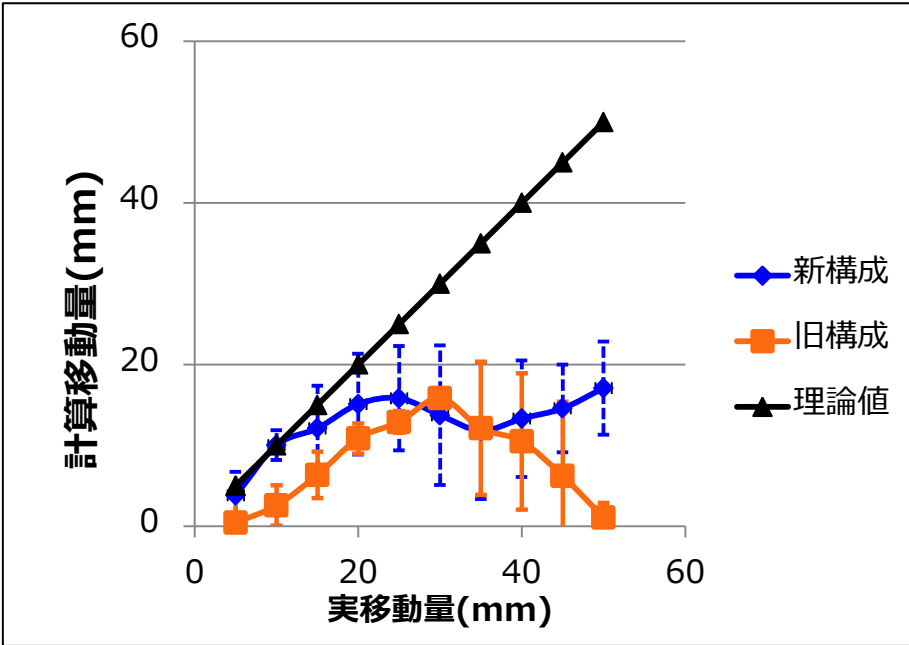


Fig. 5-13 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 150mm)

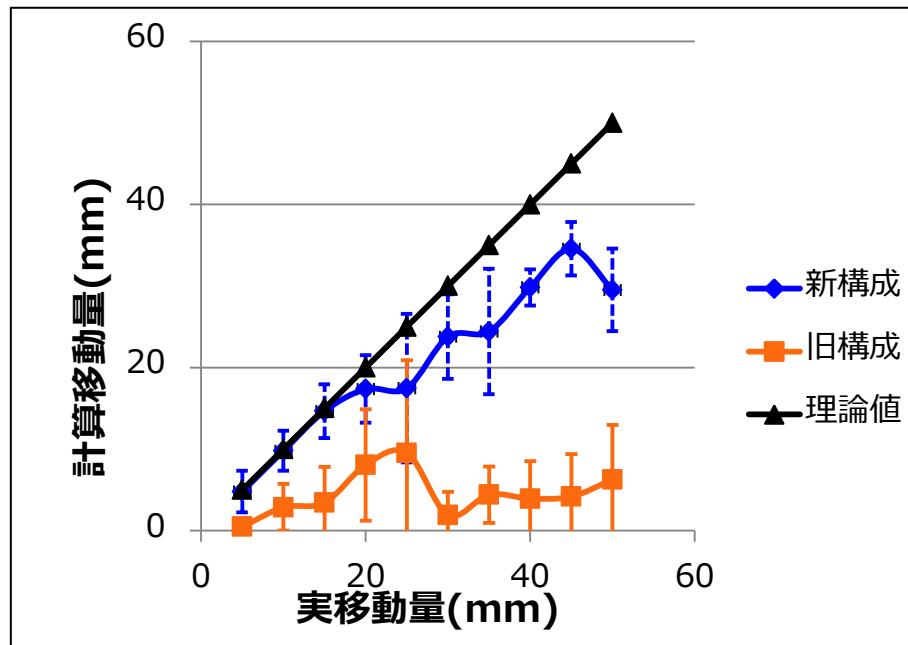


Fig. 5-14 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 200mm)

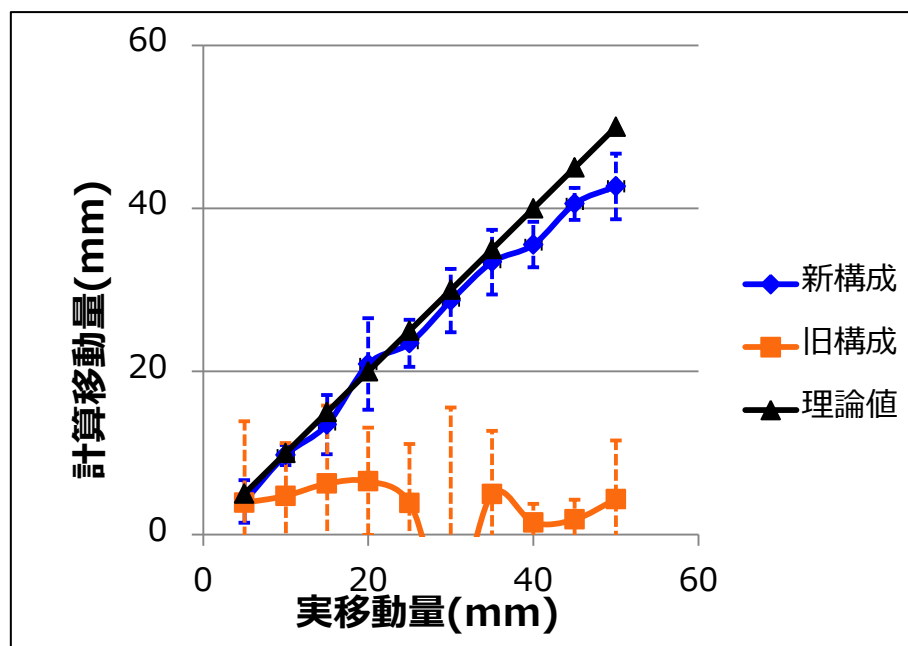


Fig. 5-15 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 250mm)

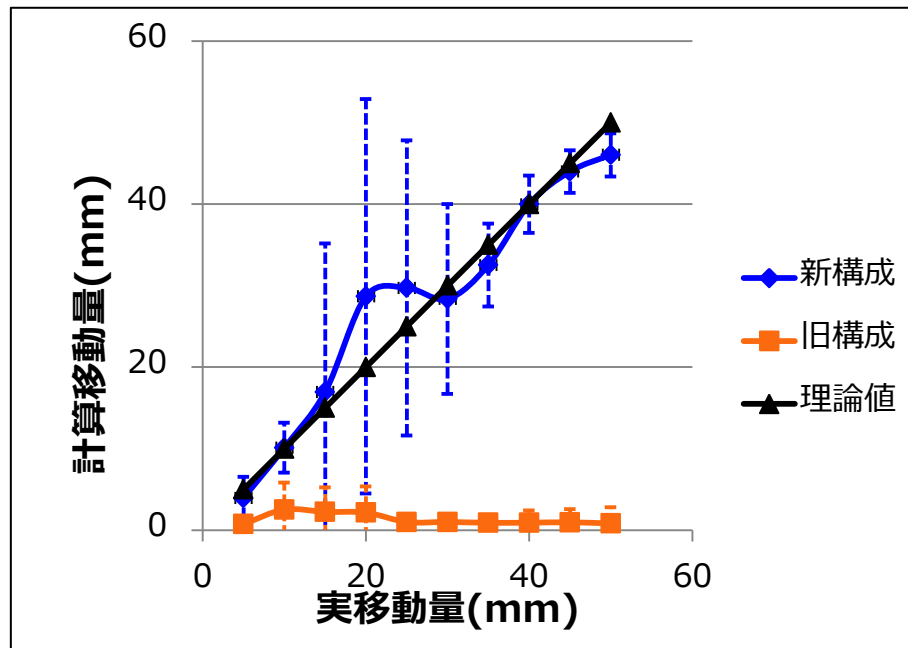


Fig. 5-16 新旧構成の運動計測精度比較(被写体距離 300mm)

Table 5-6～Table 5-9, Fig. 5-13～Fig. 5-16 より，1 か所を除き，新構成の計測結果が旧構成の結果を上回っていることが示された．撮像範囲と光学的分解能を向上させることで，運動計測の精度を向上させることができたといえる．しかし，新構成と理論値を比較すると大きな誤差を生じているものもみられた．以下では，実験結果について被写体距離ごとに考察を行う．

- 被写体距離 150mm の結果

旧構成の実験結果では，実移動量が 30mm を超えると計測精度が悪化する現象がみられる．これは，画素上の移動量が大きくなった結果，移動量計算の精度が悪化したことが原因であると考えられる．

装置の移動前と並進移動距離 5mm, 25mm, 45mm 移動後に得られた輝度値分布の比較をそれぞれ Fig. 5-17, Fig. 5-18, Fig. 5-19 に，各並進移動計測で計算された相関の最大値と，最大相関となる画素のずれ量を比較した表を Table 5-11

に示す．それぞれのデータは，各 20 回の計測のなかから任意に選択したものを
用いている．この入力データ同士を比較する場合，移動前データの中央付近に
みられる傾斜が一致するように計算されるのが理想的であると考えられる．

移動距離 5mm では，Fig. 5-17 に示されるように装置の移動前後で輝度値分
布が大きく変化しておらず，相関の最大値も高い数値を保っており，安定した
相関計算が行われたことが予想される．移動距離 25mm では，Table 5-11 に示
されるように相関の最大値が 0.51 とやや低くなっている．しかし，移動距離
5mm の画素ずれ量を比較した場合，移動距離が 5 倍になると同時に画素ずれ量
も 6.1 倍となっており，結果に極端な差はみられない．一方，移動距離 45mm で
は Fig. 5-19 で確認されるように移動前後で輝度分布が大きく変化したため，相
関の最大値が高いにもかかわらず相関計算が正しく行われず，計算結果は移動距
離 25mm のものとはほぼ同じとなった．以上の現象を一般化すると，画素上移動
量が素子数の 40%を超えると運動計測の精度が悪化することが予想される．

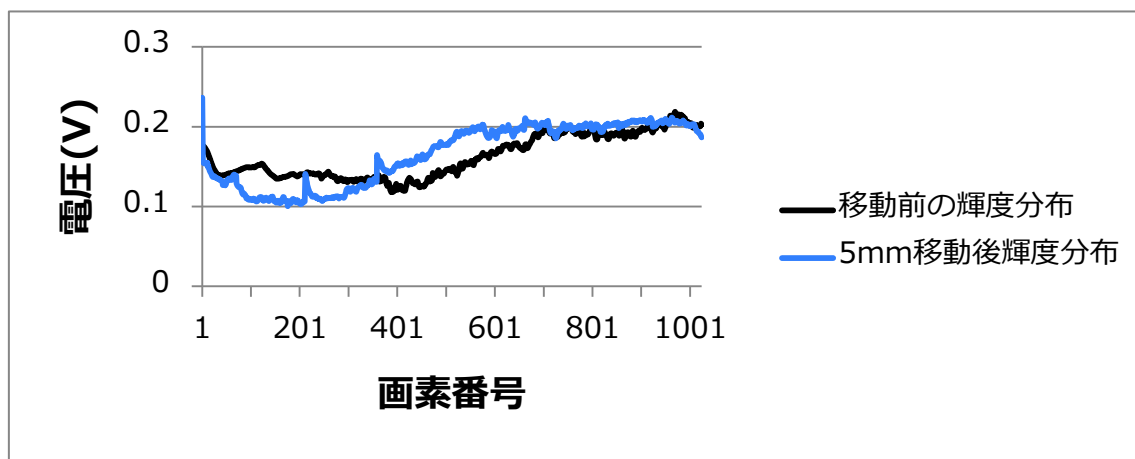


Fig. 5-17 移動前と 5mm 並進移動後の輝度値分布比較

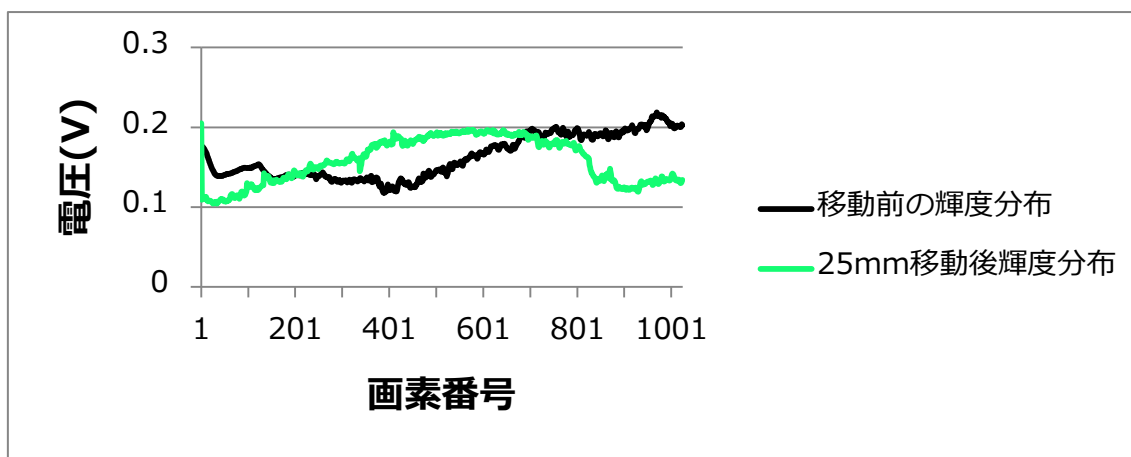


Fig. 5-18 移動前と 25mm 並進移動後の輝度値分布比較

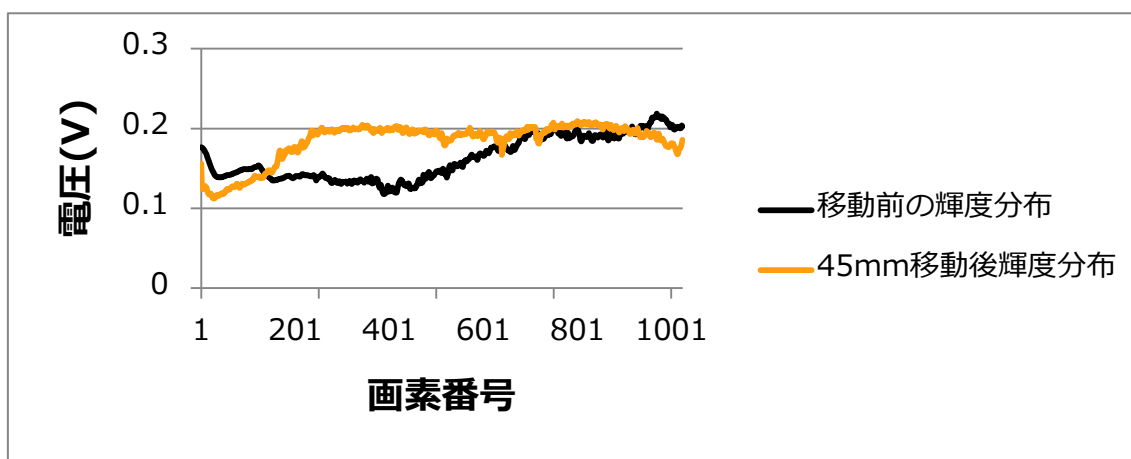


Fig. 5-19 移動前と 45mm 並進移動後の輝度値分布比較

Table 5-11 並進移動量と相関最大値・最大相関となるずれ量の比較

並進移動量(mm)	相関最大値	最大相関となる画素ずれ量(pix)
5	0.83	46
25	0.51	280
45	0.88	268

新構成では旧構成でみられたような急激な精度悪化はみられないものの、旧

構成と同様に大きな画素上移動量を伴う運動で精度が悪化する傾向がみられる。これは旧構成と同様の現象によるものであり、撮像範囲を増加させることで解決できると考えられる。すなわち、被写体との距離が近く、かつ高速な運動を計測することを想定するならば、撮像範囲をさらに向上させる必要があるといえる。

- 被写体距離 200mm の結果

旧構成の実験結果では、被写体距離 150mm の結果に比べて全般的に精度が低くなっていることがわかる。特に、移動量 30mm 以降では大幅な精度低下が起きていることがわかる。これは、前述した画素上移動量の問題に加え、光学的分解能の低さにより被写体特徴が失われたことが原因であると考えられる。

新構成の結果では、被写体距離 150mm の結果に比べて精度が改善し、実移動量に比例した計算結果が得られた。移動距離 50mm の結果では、他の計算結果に比べて大きな誤差を生じている。これは被写体距離 150mm の結果と同様に、画素上移動距離が大きくなったことが原因であると考えられる。

- 被写体距離 250mm の結果

旧構成の結果では、全域にわたって大幅な誤差を生じ、計測が不可能であった。実験装置の光学的分解能では被写体の特徴を捉えることができなかったのが原因であると考えられる。実移動距離 30mm の結果のみやや精度が回復したように見受けられるが、これは大幅な外れ値による影響である。旧構成では、被写体の特徴がこれ以上細くなると計測が不可能になることが示された。

新構成の結果では、実移動量にほぼ一致した計算移動量が得られることが示された。高速な移動が発生する状況でも問題なく計測に成功しており、構成変

更によって運動計測の精度と安定性を向上させることができたと言える。

- 被写体距離 300mm の結果

旧構成の結果は、被写体距離 250mm と同様に大幅な誤差を生じており、計測不可能となった。原因も同様であるため、ここでは省略する。

新構成の結果では、移動距離 15mm, 20mm, 25mm, 30mm で大きな誤差が発生したが、その他の移動距離では誤差は 10%に収まった。

誤差が発生した要因として、電気回路に起因するセンサ信号の乱れが考えられる。移動距離 20mm における移動前と移動後の輝度値分布を比較したグラフを Fig. 5-20 に示す。この条件における理想的な画素上移動距離は、式(3)より 71pix と求められる。よって、移動前後で輝度分布は大きく変化しないと予想されるが、実際に取得された輝度値分布は大きな変化を生じている。短時間で被写体の光量が大きく変化することは考えられないため、これはセンサ側の回路に何らかの問題が発生したと考えるのが妥当である。

その他の移動距離では運動計測が可能であるといえる。1 フレーム間の移動距離が 50mm で運動計測が可能であったことから、現段階で 174km/h の運動まで計測可能であることが示された。

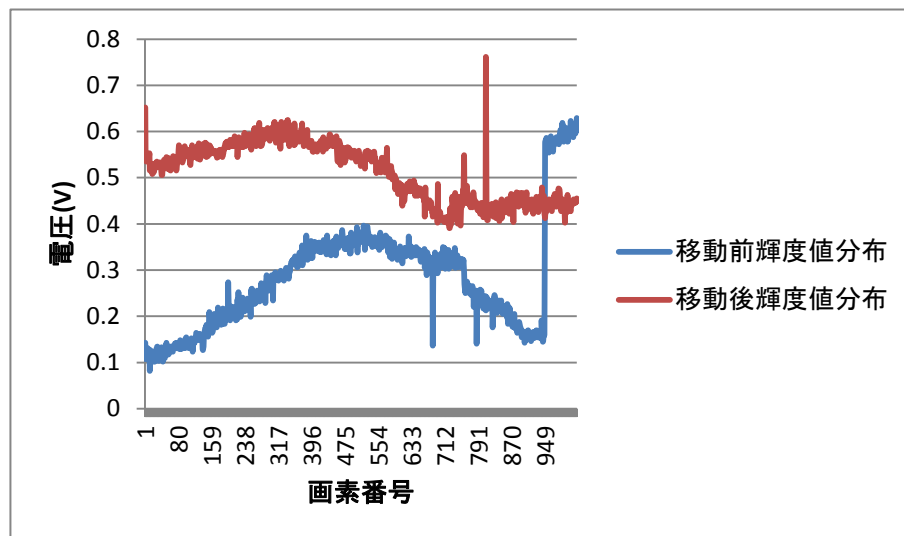


Fig. 5-20 被写体距離 300mm・移動距離 20mm における移動前後の輝度値分布比較

- 新構成の距離別結果の比較

Table 5-10 より，新装置の計測精度は被写体距離が離れるに従い向上するという結果が得られた．被写体距離 300mm の結果についても，計測結果の外れ値を排除した RMS 誤差は 10%となり，被写体距離 250mm の結果とほぼ同じとなるため，この傾向があるといえる．

5.7 評価実験の結論

本章で行った評価実験の結論を述べる．

5.7.1 構成変更による精度変化

Table 5-10 より，スリット位置と幅に関する設計変更で運動計測精度が大幅に向上したことが示された．しかしながら，近距離かつ画素上移動量が大きく

なるような運動では計測精度に大きな差がみられないという結果になった。

その他の誤差要因としては、光学収差による影響が考えられる。これを解消するには、複数の光学系からなる装置構成を考える必要がある。

5.7.2 被写体距離による精度変化

旧構成では被写体距離が増加すると急激に計測精度が低下したが、新構成では精度が一部を除き安定するという結果になった。構成を変更し、光学的分解能を向上させたことにより、被写体距離の変化に対しても安定した計測が可能になったといえる。特に、被写体距離 250mm 以遠では、速度換算で 174km/h まで計測可能であることが示された。この数値は、人間の運動を計測するには十分な値であるといえる。

5.7.3 被写体特徴による精度変化

理想的な環境での実験結果に比べ、移動量が大きくなるにつれて精度が悪化するという結果が得られた。旧装置では精度が不十分であったために発見されなかった問題が、装置構成の変更により発見されたといえる。今後は、光学的分解能をさらに向上させ、被写体の特徴をより細かく捉えることで精度を改善させることができると期待される。

第6章

複数の装置を利用する効用

本章では，提案する装置を複数利用する効用について述べる．本研究で提案する装置単体では，運動を計測できる方向が 1 次元に制限され，画素上移動量の推定が可能という特徴をもっている．しかし，本研究の目的は高速な 3 次元運動の計測・復元であるため，単体ではこの目的を達成できない．加藤らはこの原因のうち 3 次元運動を計測できないという問題を解決するため，カメラを 3 台用い，Fig. 6-1 のように 3 方向に配置することで 3 次元並進運動・回転運動の計測が可能であることを示した．本章では加藤らとは別のアプローチをとることで，実移動量を直接計算できないという問題を解決することを試みる．

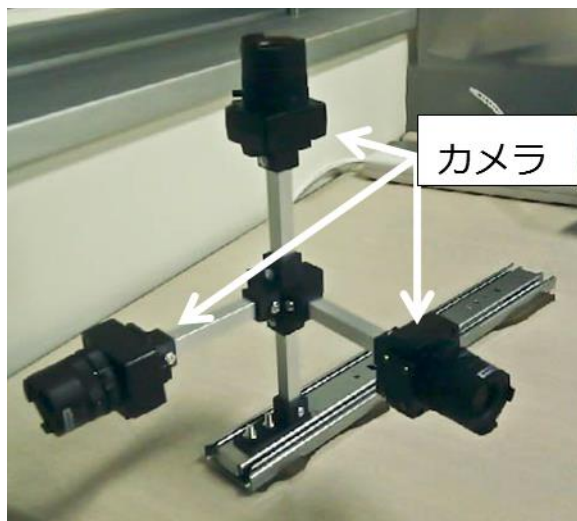


Fig. 6-1 加藤らが使用した 3 次元運動計測装置の構成（再掲）

6.1 本手法の移動量計算の問題点

提案する手法において、実移動量 T_r を計算する式は 3.2 節で述べたとおり、以下の式で表される。

$$T_r = \frac{S_p}{f \times S_i} \times \frac{D}{W} \times T_i$$

このうち、 S_p, f, S_i, W は装置の内部パラメータであるため既知である。 T_i はフレーム間の画素上移動量であるため、フレーム間の輝度分布を相互相関で比較すれば算出することができる。しかし、 D は被写体までの距離であり、本研究で想定する計測環境では未知パラメータとして扱われる。つまり、実移動量を計算するための式に未知数が含まれているため、このままでは実移動量の計算が不可能である。

6.2 実移動距離の直接計算

6.1 節で挙げた問題に対し、装置を 2 台使い、平行に並べることで解決を図る。これまでの移動量計測では、1 台の装置で得られた輝度分布をフレーム間で比較していたが、今回の構成では平行に並べられた 2 台の装置間で同時に得られた輝度分布を比較する。装置間の実距離が既知であり、装置間の画素上距離を輝度分布の相互相関で求めることができれば、そこから被写体までの距離を計算できることが期待される。

装置構成の模式図を Fig. 6-2 に示す。図に示されるように、2 台の装置で同時に得られた輝度分布を相互相関で比較し、得られた画素上距離 T_i から装置間の実

距離 D_s を計算すると、以下のように求められる。

$$D_s = \frac{S_p}{f \times S_i} \times \frac{D}{W} \times T_i \quad \dots \text{式(4)}$$

上式で、 D_s は装置設計時に決定されるため、既知として扱うことができる。
さらに、 S_p, f, S_i, W は装置の内部パラメータであるから、未知パラメータは被写体までの距離 D のみである。式を整理して

$$D = \frac{W \times f \times S_i}{S_p \times T_i} \times D_s \quad \dots \text{式(5)}$$

これをフレーム間移動量の計算式に代入することで、画素上移動量から実移動量への変換を行うことができる。

以上より、平行に並べた 2 台の装置を用いることで実移動量の計算が可能である。

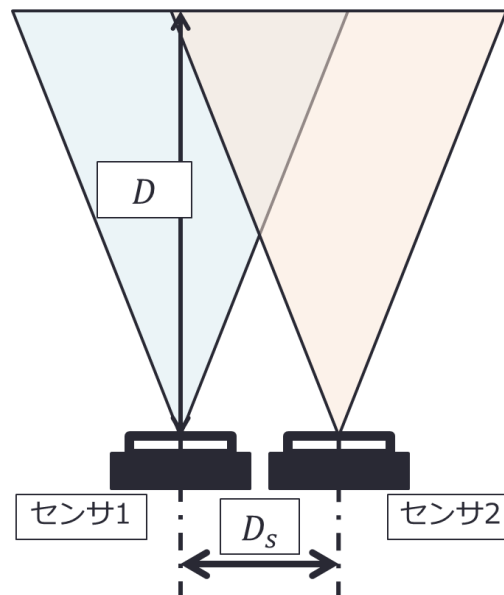


Fig. 6-2 実移動量を直接計算するための装置構成模式図

6.2.1 センサ個体差

同種のセンサを複数用いるとき常に問題となるのが、センサ間の個体差である。センサの出力には個体差があり、同じ環境で使用したとしても違うセンサを用いれば異なる結果が得られる。極端なものでは、出力個体差が数倍になることもある。この現象を放置したままセンサを利用すると、センサ間の情報を比較・処理する大きな妨げになる危険性が高いため、一般的にはキャリブレーションなどによってセンサ個体差を補正してから使用する。本章で提案する構成では 2 つのセンサから得られた情報を比較するため、この問題を解決する必要がある。

この問題は、相互相関を用いたデータ比較によって自動的に解消され则认为られる。相互相関による相関値の計算は、2 つのベクトルがなす角の余弦成分の計算と同義に扱うことができる。ベクトル \mathbf{a} , \mathbf{b} のなす角 θ の余弦成分 $\cos\theta$ を計算する式は、以下のように表される。

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|}$$

これを書き換えて

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} \cdot \frac{\mathbf{b}}{|\mathbf{b}|}$$

上式より、各ベクトルが正規化されてから計算されていることがわかる。本手法でも同じ計算を行うため、比較する 2 つのデータの大きさはどちらも 1 に整えられ、センサ個体差は解消される。

以上より、1 つのセンサ内で素子間の出力個体差が少なければ、センサ個体差に関する厳密なキャリブレーションの必要性は少ないと考えられる。ただし、今回用いたリニア CMOS センサ「S10077」および「S11638」は出力される電圧にオフセット電圧が含まれているため、この補正は行う必要がある。

6.3 期待される副次的効果

この構成には実移動量を直接計算できるだけでなく、優先度は低いが本手法のもつほかの問題点を改善できる可能性を持っている。本節では、期待される副次的な効果について述べる。

6.3.1 精度の改善

今回の構成は、被写体距離を推定することで実移動量を直接計算可能にすることを目的としているが、実移動量と画素上移動量の比例関係を導くことができるという効果ももっている。5.3 節の検証実験では、理想的な環境では実移動量と画素上移動量の間に良好な比例関係がある、しかしながら精度自体は改善する必要があるという結論が導かれた。以上 2 つの特徴から、画素上移動量、および被写体距離の計算精度が悪かったとしても、それらを実移動量計算に用いることで、被写体距離を既知として計算したときよりも計測精度を向上させることができると期待される。

6.3.2 移動量計算の安定性向上

いうまでもなく、今回の構成では 2 台の装置どちらからでも移動量の計算が可能である。仮に、5.3 節で行った実験結果の一部でみられたような移動量計算の失敗が一方の装置で起きたとしても、他方の装置で計測が成功していればそ

の結果を用いることで誤差を緩和できることが期待される。ただし、これを実装するためには人間の身体運動に関する拘束条件などを考慮する必要がある。

6.4 システム構成

実際に作成したシステム構成を Fig. 6-3 に示す。実験装置を 2 台用い、治具によって平行に固定した。治具は 3D プリンタで作成した。実験装置構成は第 4 章と同様であるが、使用したセンサは浜松ホトニクス製「S11638」に変更した。

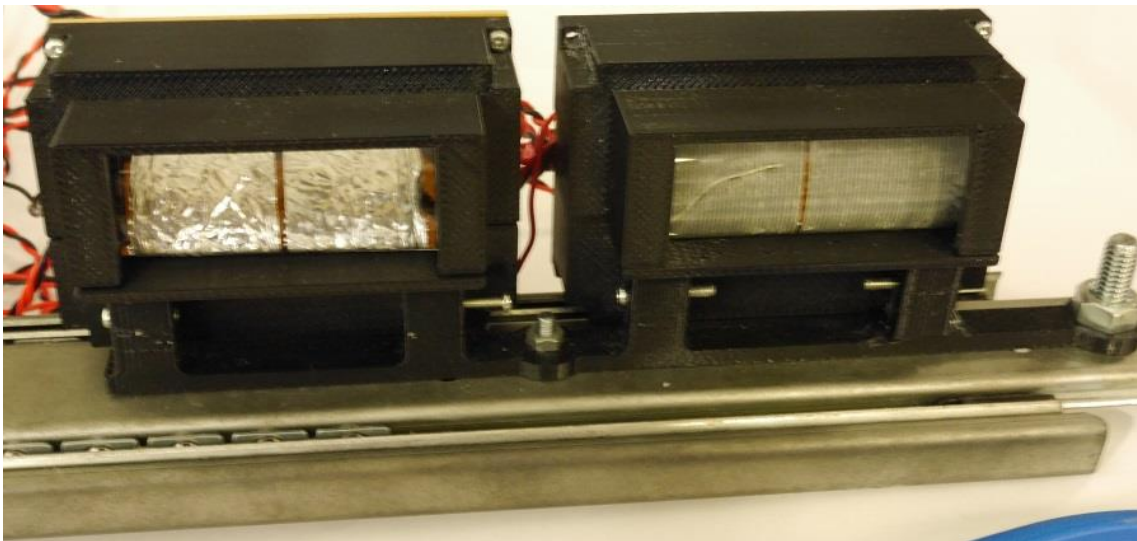
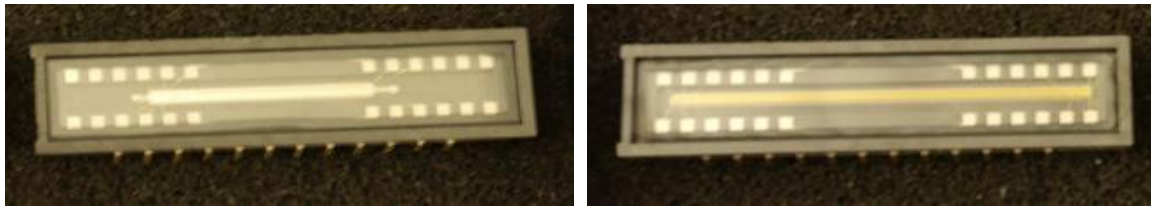


Fig. 6-3 システム構成



(a)S10077

(b)S11638

Fig. 6-4 用いたセンサの比較. (a):S10077, (b):S11638

- 治具, カバー

治具は 3D プリンタで作成したものを用了. 実物の画像を Fig. 6-5 に, 治具とスライドレールを固定した画像を Fig. 6-6 に示す. 2 台の実験装置を平行に固定するため, Fig. 6-7 に示すようにカバー片側に治具と接合するための部品を追加した.

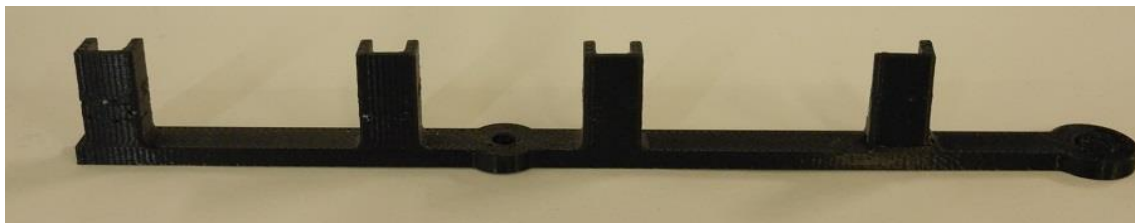


Fig. 6-5 治具画像

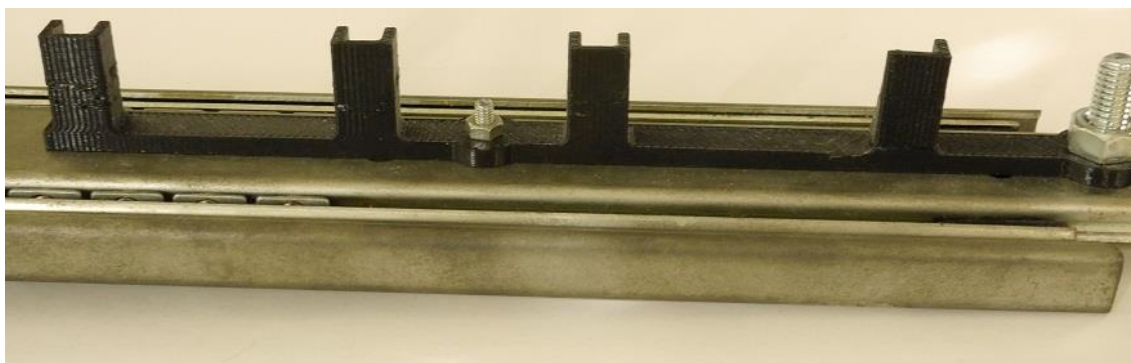
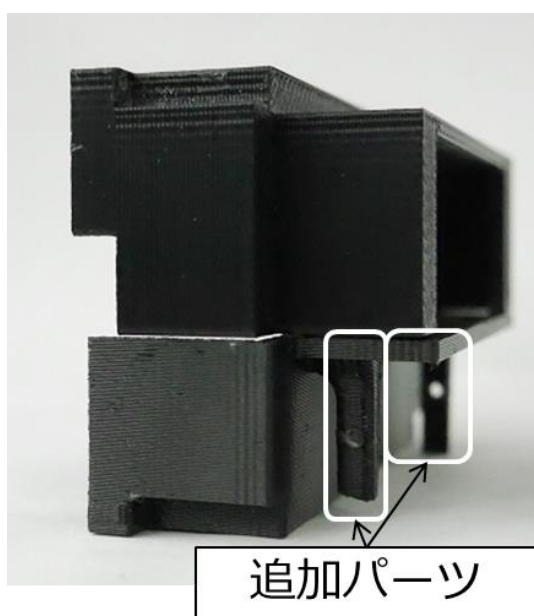
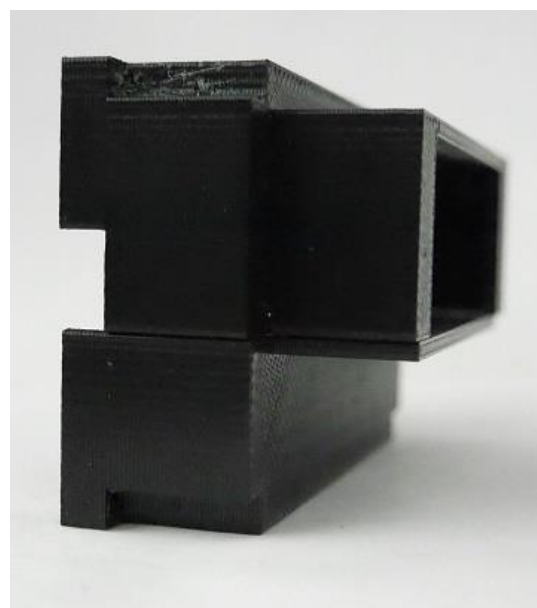


Fig. 6-6 治具をスライドレールに固定した状態



(a)第6章で用いたカバー



(b)第5章で用いたカバー

Fig. 6-7 カバー比較

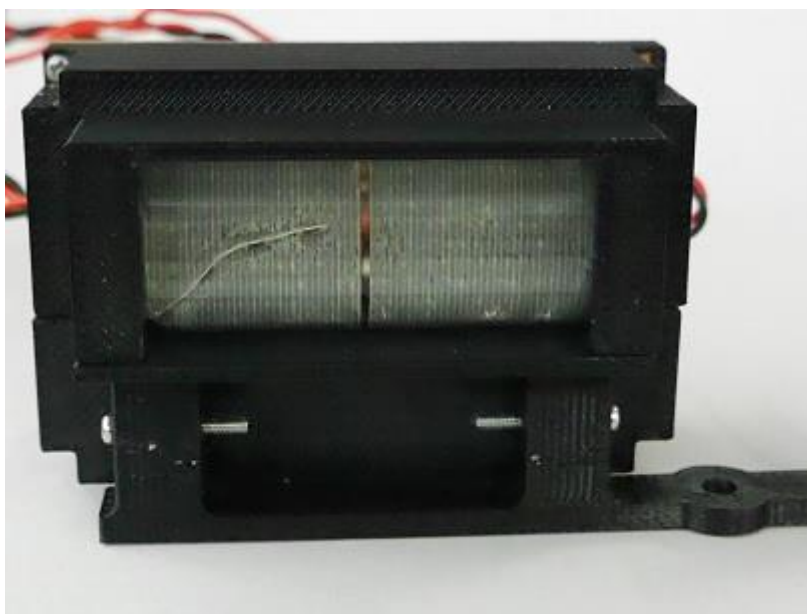


Fig. 6-8 実験装置と治具を固定した状態

- センサ

本実験では、センサを「S11638」に変更した。「S10077」と比較すると、画素数が 1024 個から 2048 個に増加したほか、センサが高感度になっている。

「S10077」と「S11638」を比較した表を Table 6-1 に示す。

Table 6-1 センサ仕様比較

センサ名称	S10077	S11638
外形寸法	41.6mm×9.1mm	41.6mm×9.1mm
画素数	1024	2048
画素ピッチ	14μm	14μm
受光面長	14.336mm	28.672mm
データ読み出しレート	最大 972Hz	最大 972Hz

6.5 実験

6.5.1 目的

本章の目的は、装置を 2 台用いることにより被写体距離を計測し、実移動量を直接計算することである。この実験では、被写体距離の計測精度はどの程度か、その結果を用いて計算された実移動量の計測精度はどの程度かを評価した。

6.5.2 実験内容

実験環境を Fig. 6-9 に示す。実験装置 2 台を治具に固定し、治具をスライドレールに固定した。装置が移動しても被写体までの距離を一定に保てるように、被写体となる環境は実験装置と平行に配置した。被写体として室内の書籍を利用した。2 台の実験装置出力に関する厳密なキャリブレーションは行わず、AD ボードの入力許容電圧を超えない程度に分圧して調整した。実験装置と被写体の距離を 250mm から 450mm まで 50mm 刻み、1 フレーム間の装置移動量を 10mm から 40mm まで 10mm 刻みに変化させた。移動量計測は各 20 回行い、平均値と標準偏差を算出した。得られた移動ピクセル量と被写体距離から移動量を計算し、実移動量と比較した。

実験結果を Table 6-2, Table 6-3, Fig. 5-13～Fig. 5-16 に示す。Fig. 5-13～Fig. 5-16 のグラフでは、新旧実験装置より得られた移動量と実際の移動量が構成ごとにまとめられている。

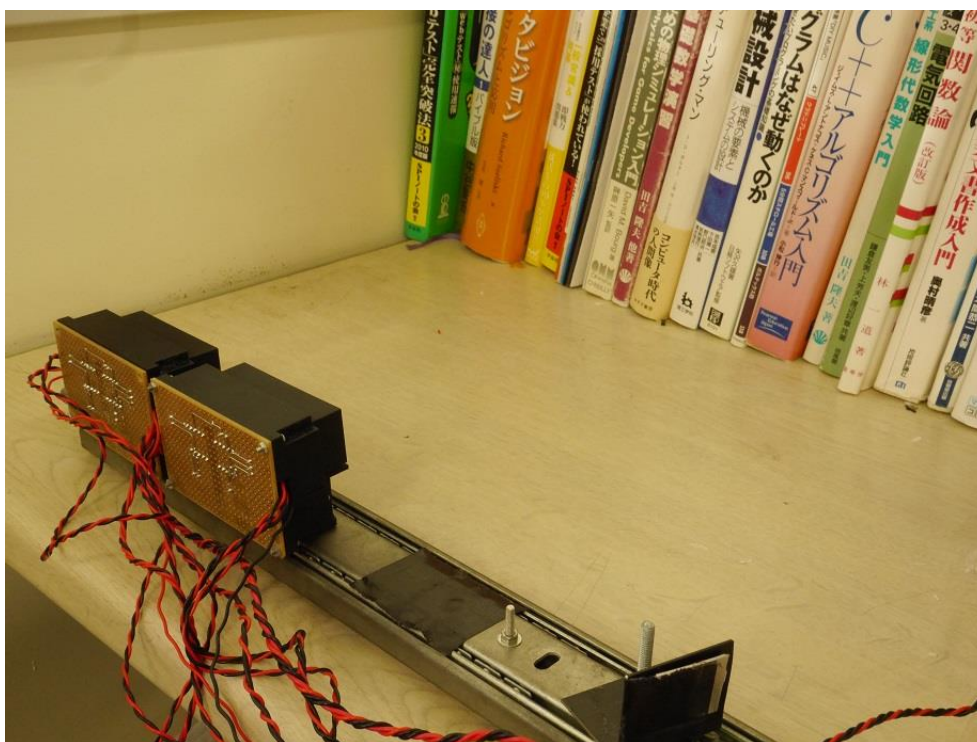


Fig. 6-9 実験環境

Table 6-2 被写体距離計算結果

被写体距離(mm)	250	300	350	400	450
計算結果(mm)	217.0	239.8	270.8	299.7	386.7
標準偏差(mm)	35.9	2.8	4.7	4.4	92.2

Table 6-3 実移動距離計測実験結果

被写体距離(mm)	実移動距離(mm)	10	20	30	40
250	計算結果(mm)	10.0	18.4	30.5	52.1
	標準偏差(mm)	1.7	3.7	2.4	18.2
300	計算結果(mm)	10.5	20.8	30.0	38.8
	標準偏差(mm)	1.0	1.1	1.1	1.9
350	計算結果(mm)	11.5	21.8	34.6	44.6
	標準偏差(mm)	2.2	1.2	12.8	15.6
400	計算結果(mm)	11.4	20.2	31.0	40.9
	標準偏差(mm)	2.1	1.5	1.9	2.9
450	計算結果(mm)	11.4	22.7	36.2	53.3
	標準偏差(mm)	5.1	7.8	19.1	22.0

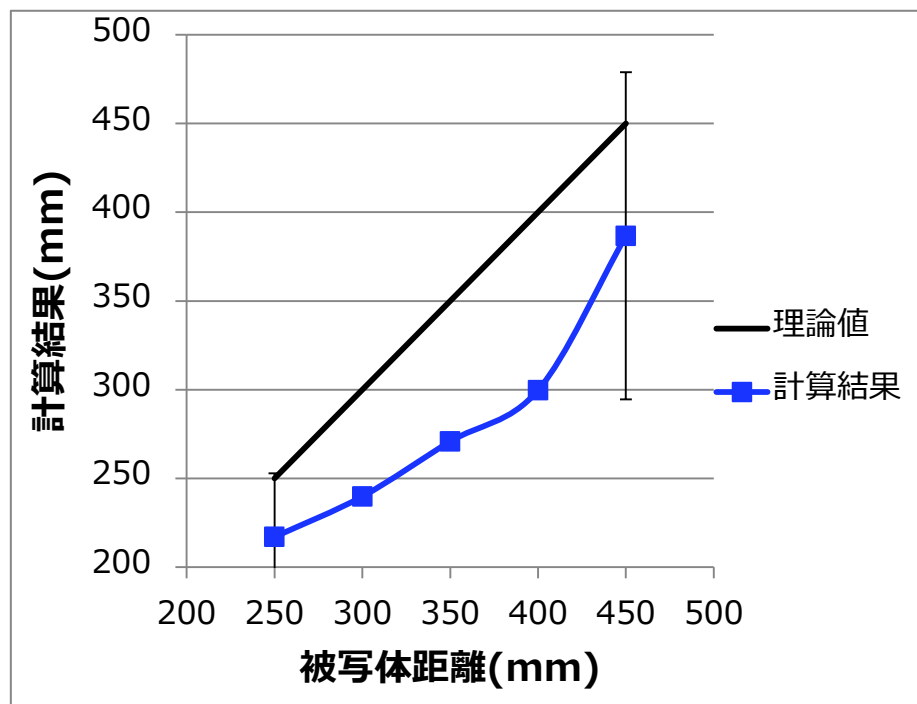


Fig. 6-10 被写体距離計算結果

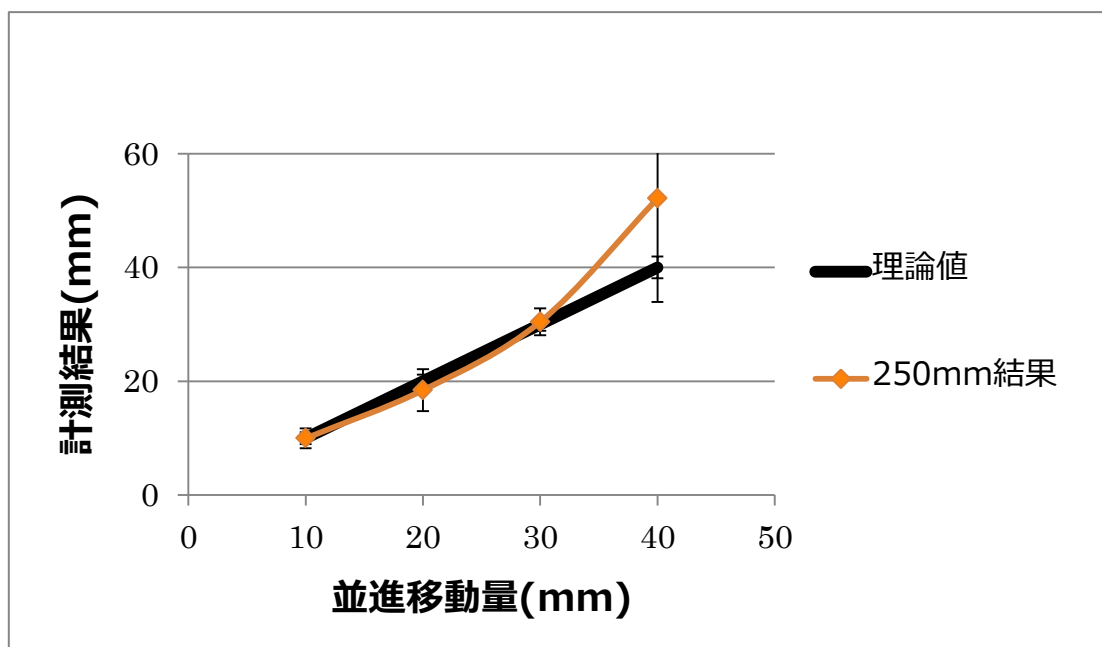


Fig. 6-11 被写体距離 250mm における実移動距離計測結果

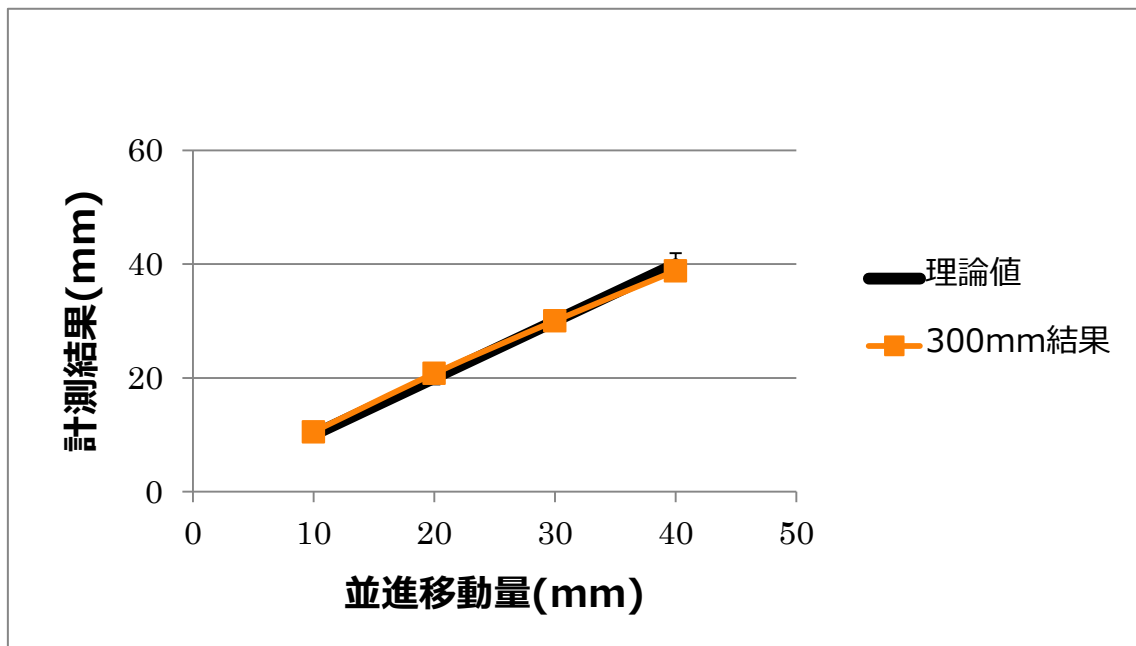


Fig. 6-12 被写体距離 300mm における実移動距離計測結果

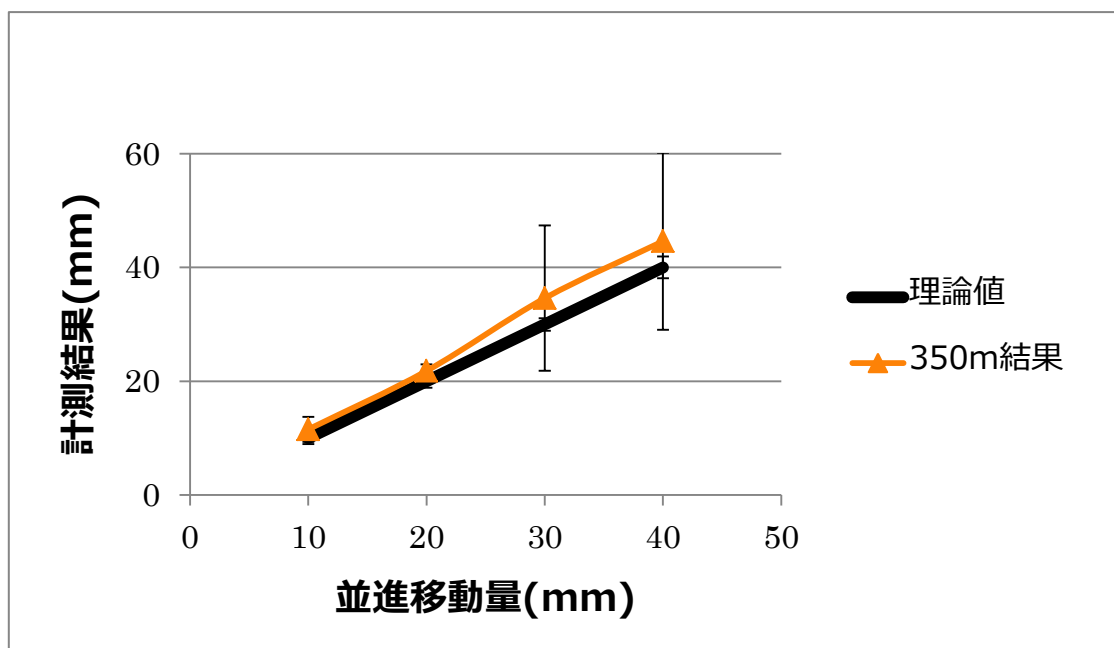


Fig. 6-13 被写体距離 350mm における実移動距離計測結果

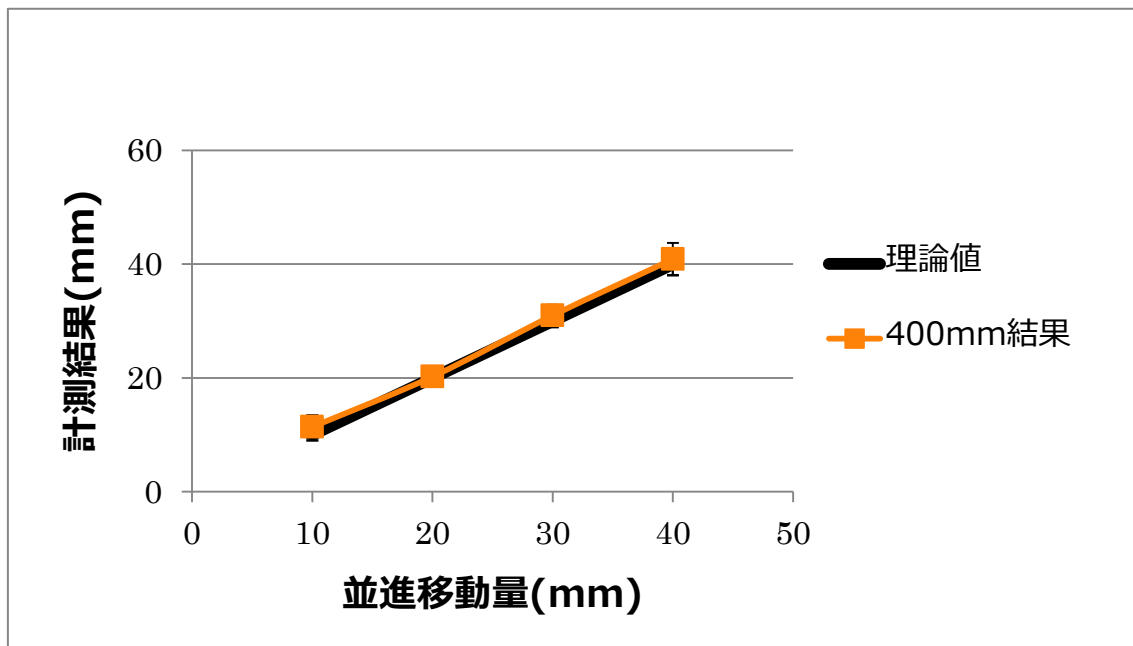


Fig. 6-14 被写体距離 400mm における実移動距離計測結果

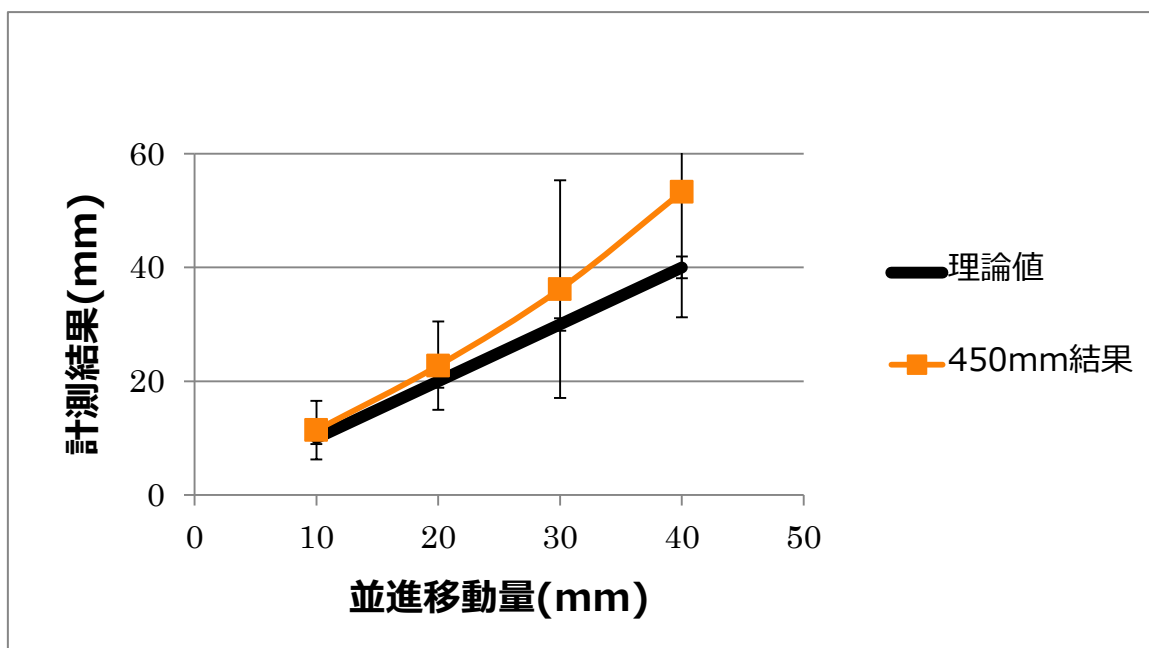


Fig. 6-15 被写体距離 450mm における実移動距離計測結果

6.6 考察

6.6.1 被写体距離の算出

Table 6-2 より，精度は 80%にとどまったものの，提案する構成によって被写体距離の算出が可能であることが示された．各距離での結果をみると，被写体距離 250 と 450mm で大きな誤差が発生している．この原因を考察する．

被写体距離 250mm の結果で発生した誤差要因として，装置間距離が 80mm であったために画素間距離が大きくなり，画素上のずれ量計算の精度が悪化したことが考えられる．80mm という実距離は，本論文で画素間距離を計算する距離の設定としては一番大きいものである．それに加え，本実験で被写体距離が最も小さいことから画素上の距離が最も大きく離れた状態での計算となった．この問題は，装置間距離を検討することで解決できると考えられる．

被写体距離 450mm の結果で発生した誤差要因として，装置の光学的分解能で被写体の特徴をとらえきることができなかったことが考えられる．この結果からも，計測精度を改善するためには光学的分解能を向上させることが必要であるといえる．

6.6.2 実移動量の直接計算

6.6.1 節では被写体距離の計算精度が 80%に留まっていたにも関わらず，多くの領域で精度が改善するという結果になった．これにより，6.2.1 節のセンサ個体差の問題が精度に大きく影響せず，6.3.1 節で述べたような精度改善効果があ

ることが示された．また，相互相関を用いた移動量計算は計算速度だけでなく計測精度の観点からも有効であるといえる．

被写体距離 450mm の結果で発生した誤差については，6.6.1 節と同様に光学的分解能が原因であると考えられる．フレーム間移動距離の計算，被写体距離の計算双方で誤差が発生したために，実移動距離の計算が不安定かつ誤差を多く含む結果になったといえる．

6.7 実移動量計算の結論

実験装置を 2 台平行に並べ，装置間の画素上移動距離から被写体距離を算出する構成を提案した．評価実験より，この構成で実移動量の直接計算が可能であることが示された．あわせて，相互相関を用いた画素上距離計算により，センサ個体差による影響を大きく受けない計算が可能であることも示された．

発生した誤差の要因は，装置間距離の設定と光学的分解能が支配的であると考えられる．これを改善することで，運動計測の精度を向上させることができると期待される．特に光学的分解能は全実験の誤差要因として挙げられており，計測精度改善のためにはこれを改善するのが急務であるといえる．

第7章

結論

本論文では, 人間の運動全てを計測できる手法を開発するため, リニア CMOS センサとシリンドリカルレンズを用いた運動計測手法を提案した. 評価実験により, 提案手法に関して以下の 4 点が示された.

1. 972pfs で 1 次元運動計測が可能であること
2. 計測精度が環境に依存しにくいこと
3. 計測精度を改善するために必要な要素を検討し, 光学的分解能と撮像範囲を改善することで精度向上が可能であること
4. 装置 2 台を平行に並べることで被写体距離の計算を可能にし, 実移動距離を直接計算できること

7.1 今後の展望

本研究の目的である人間の運動計測を達成するために想定される課題は, 以下の通りである.

1. 回転移動の計測
2. 光学系要素の検討

3. 並進・回転複合移動の計測
4. 2次元・3次元運動の計測
5. アルゴリズム検討
6. 計測装置の無線化

7.1.1 回転移動の計測

本論文では提案手法の原理的な検証を目的としたため、計測する運動は1次元並進運動に限定されていた。しかし、運動計測装置として開発するのであれば回転運動や3次元運動の計測は必須である。よって、1次元回転運動の計測を行い、1次元運動計測の特性を評価したのち、1次元並進・回転複合運動の計測、2次元運動の計測などを行っていく必要がある。

7.1.2 光学系要素の検討

今回の構成要素はシリンドリカルレンズとスリット、リニア CMOS センサのみであり、発生した3次元収差を無視して計測を行った。一般的な撮像装置は3次元収差を補正するために複数の光学系から成っている。提案手法においても、複数の光学系を導入して3次元収差を補正することで、運動計測の精度を向上させることができると考えられる。

今回の設計では、輝度情報の光学的な圧縮を単一のシリンドリカルレンズのみで行い、スリットによって光学的な分解能を得ている。センサ中央に入射する光はレンズ光軸と平行であるため焦点で収束するが、センサ端点に入射する光は光軸に対して斜めであるため3次元収差が生じる。これはレンズ入射角の差による光路差が原因であるため、光路差の少ないレンズ、つまり薄いレンズ

であれば 3 次元収差の影響が小さくなることが予想される。

7.1.3 並進・回転運動の計測, 3 次元運動の計測

本手法は, 使用するデータを 1 次元に圧縮することで大幅な高速化を実現した。このため本来 2 次元データから得られる情報が欠落しており, これが 3 次元運動を復元する妨げになることが考えられる。

加藤らは, カメラを 3 台使用することで 3 次元並進運動の計測, および 1 次元回転運動の計測に成功した。しかし, 並進・回転の複合運動や 2 次元以上の回転運動の計測は今後の課題として残された。このアルゴリズムでは 2 次元データを用いる処理が含まれているため, 本手法ではさらに多くの装置が必要になると考えられる。

7.1.4 アルゴリズム検討

今回移動量計算に用いたアルゴリズムは単純な相関計算から成り立っているため, 計算コストを削減する余地がある。今回の計算速度評価では装置のフレームレートを下回ってしまったが, パワースペクトルの計算を導入することで大幅な高速化が図れる。

7.1.5 計測装置の無線化

本論文で使用した装置は, データ取り込みを全て AD ボードで行っている。本研究が目指す運動計測は, 人間の運動を阻害することがないように無線化す

ることが求められる．そのため，複数の装置を身体各所に設置し，得られたデータを総合して運動を復元する必要がある．しかし，輝度値データを逐一 PC に送信するとデータ量が膨大になるため，リアルタイム処理が非現実的になる．そのため，身体に装着する装置には，センサから得られた値を取り込み，移動量計算を行ったのち，結果を無線で PC へ送信するための装置が必要である．

7.2 原理上の問題点

この節では，提案手法で運動計測を行う上で問題になると考えられる点について述べる．

7.2.1 原理的に計測が困難になる状況

提案手法は計測環境の輝度値分布の特徴が十分に豊富であることを前提とし，装置の移動に伴う輝度値分布の変化から移動量を推定している．そのため，装置が移動しても輝度値分布が変化しないような環境では，移動量を推定することができない．また，輝度値分布が存在しても周期的に変化するような環境では，計測精度が著しく低下することが考えられる．このような状況で得られる輝度値分布の端的な例を Fig. 7-1, Fig. 7-2 に示す．

しかしながら，このような状況は用意された特殊な室内で発生することがほとんどであり，本研究が目指すような自然な環境における計測で発生することは極めてまれであると考えられる．したがって，この問題は解決すべき課題から除くことができるといえる．

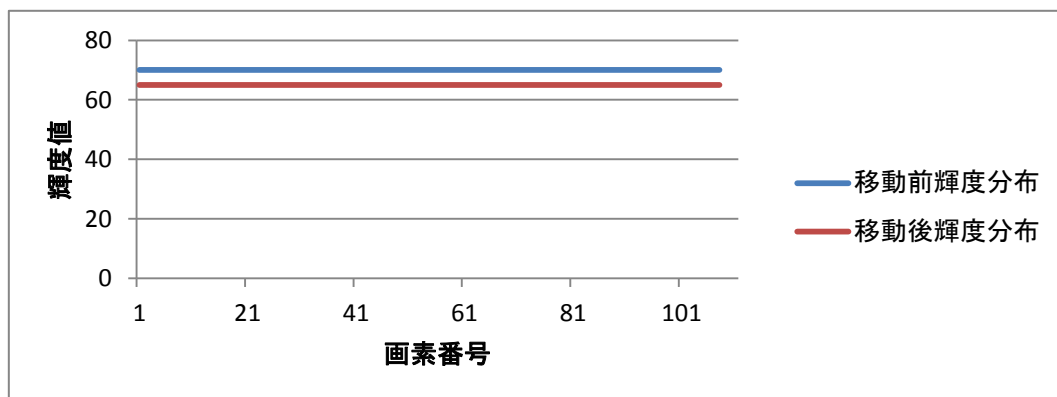


Fig. 7-1 原理的に計測不可能になる状況の例．移動前後で輝度値分布が全く変動しない．

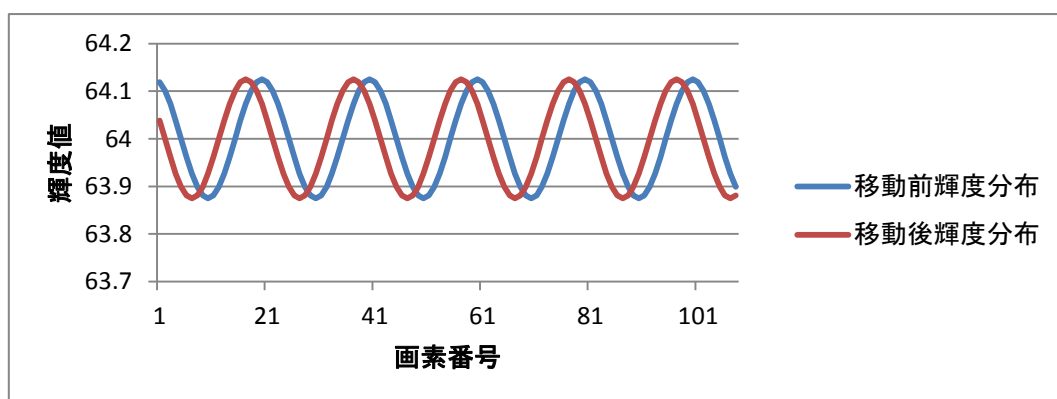


Fig. 7-2 原理的に計測が困難になる状況の例．輝度値分布が周期的に変化しており，装置から見て左右どちらにどの程度移動したかをシステムでは判別することができない．

7.2.2 高速性と光量

撮像装置を高速で動作させる際に発生する問題点として，得られる光量の低下が挙げられる．高速で動作させ，高いフレームレートを維持したまま撮像し

続けるためにはシャッタースピードを短くせざるを得ず、結果として S/N 比が悪化する。本研究では、計測の高速性を確保するために高いフレームレートで撮像を行う必要があるため、この問題への対策が必要であると考えられる。

この対策として、より高性能なセンサを利用する他に、縦方向集光範囲の広いレンズを用いるといった方法が挙げられる。シリンドリカルレンズの寸法を変更し、センサへの入射光量を増加させることで、S/N 比を増加させることができる。また、装置縦方向の撮像範囲が拡大することにより、垂直方向の運動に対する安定性も確保することができる。ただし、レンズ寸法を単純に大型化させると、装置の重量増加や大型化により使用者の運動を阻害する危険性がある。

この問題は、リニアフレネルレンズを用いることで回避できると考えられる。リニアフレネルレンズは、シリンドリカルレンズをフレネルレンズの形状にしたものである。フレネルレンズは、Fig. 7-3 に示す形状をしたレンズであり、一般的なレンズ同様の集光性能を持ちながら、重量や厚みを低減させることができる。これをシリンドリカルレンズに適用したものがリニアフレネルレンズで、1 方向への集光を可能にしつつ、重量や厚みの低減が可能である。これにより、重量の増加や装置の大型化を抑制することができると期待される。

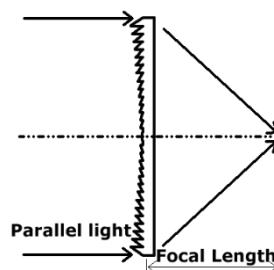


Fig. 7-3 フレネルレンズの構造 [17]

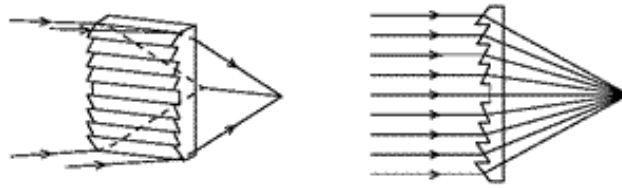


Fig. 7-4 リニアフレネルレンズの構造 [18]

7.2.3 低速な運動の計測

本論文で行った検証実験は高速な運動の計測が主であり、低速な運動計測の実験は行わなかった。しかしながら、人間が実際に行う運動には低速な運動も含まれている。相互相関によってフレーム間移動量が発生しない程度の低速な運動が長時間行われると、実際の移動量と大きな誤差を生じることが考えられる。

この問題は、運動計測を行う時間的間隔を長くとることで対策できると考えられる。具体的には、センサ側のフレームレートを一時的に落とす、比較するフレーム間隔をソフトウェアで制御する、などが挙げられる。

前者の方法はシャッタースピードが長くなるため、副次的な効果として S/N 比が増加する。これにより計測精度の向上が期待される。しかし、使用者の運動が急激に変化し高速な運動を行った場合、センサ設定を変更するまでの間、運動の情報が欠落する危険性がある。

後者の方法は前者とは異なり、フレームレート自体は変化しないため S/N 比を向上させることはできない。しかし、フレーム間隔の制御はソフトウェアで高速に切り替え可能であるため、高速な運動にも素早く対処可能であるという利点がある。

参考文献

- [1] I. E. Sutherland, "A head-mounted three dimensional display,"
Proceedings of the AFIPS '68 fall joint computer conference, vol. part I,
pp. 757-764, 1968.
- [2] 江原 義弘, “リハビリテーションにおけるモーションキャプチャ技術の
応用,” システム制御情報学会, 第 巻 46, 第 8, pp. 476-483, 2002.
- [3] "NIKE, Inc. - Nike Sport Research Lab Incubates Innovation," [Online].
Available:
[http://nikeinc.com/news/nike-sport-research-lab-incubates-innovation#/
inline/21648](http://nikeinc.com/news/nike-sport-research-lab-incubates-innovation#/inline/21648). [Accessed 13 1 2014].
- [4] "Avatar Making The Movie Discovery News," [Online]. Available:
<http://news.discovery.com/tech/videos/avatar-making-the-movie.html>.
[Accessed 13 1 2014].
- [5] "The Last of Us - Motion Capture - YouTube," [Online]. Available:
<http://www.youtube.com/watch?v=9TxJWY19xxk>. [Accessed 13 1 2014].
- [6] "Xbox 360 - Kinect - Xbox.com," [Online]. Available:
<http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>. [Accessed 12 1 2014].
- [7] "Wii Wii リモコン," [Online]. Available:
http://www.nintendo.co.jp/wii/features/wii_remote.html. [Accessed 12 1
2014].
- [8] Phasespace Inc., "PhaseSpace optical motion capture systems,"
[Online]. Available: <http://phasespace.com/>. [Accessed 11 9 2013].

- [9] "Xsens 3D Motion Tracking," [Online]. Available:
<http://www.xsens.com/>. [Accessed 11 9 2013].
- [10] Takaaki Shiraori, Hyun Soo Parky, Leonid Sigal, Yaser Sheikh, Jessica K. Hodgins, "Motion Capture from Body-Mounted Cameras," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, pp. 1-10, 2011.
- [11] Kojiro Kato, Kris M Kitani, and Takuya Nojima, "Ego-motion analysis using average image data intensity," *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference*, no. 9, 2011.
- [12] 横山 恵子, 奥村 光平, 奥 寛雅, 石川 正俊, "高速視線制御システムを用いた物体追跡のための背景除去アルゴリズム," 第13回システムインテグレーション部門講演会, pp. pp. 2037-2240, 2012.
- [13] Welch, Greg et al., "The HiBall Tracker: High-Performance Wide-Area Tracking for Virtual and Augmented Environments," *Virtual reality software and technology*, pp. 1-10, 1999.
- [14] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1150-1157, 1999.
- [15] Wen Lik Dennis Lui, Titus Jia Jie Tang, Tom Drummond and Wai Ho Li, "Robust Egomotion Estimation using ICP in Inverse Depth Coordinates," *Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1671-1678, 2012.
- [16] "trinket Kinect センサーの寸法を測ってみた," [Online]. Available:
<http://tgifjnk.blog76.fc2.com/blog-entry-791.html>. [Accessed 26 1 2013].
- [17] "フレネルレンズ 製品情報 日本特殊光学樹脂," [Online]. Available:

http://www.ntkj.co.jp/product_fresnel.html.

[18] "リニアフレネルレンズ 製品情報 日本特殊光学樹脂," [Online].

Available: http://www.ntkj.co.jp/product_linearfresnel.html. [Accessed 15 1 2014].

発表文献

- [1] 関口 和人, 野嶋 琢也, “画像の輝度平均情報を用いた高速な運動計測手法の提案”, 第 13 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 1663-1668, 2012.
- [2] 関口 和人, 野嶋 琢也, “画像の輝度平均情報を用いた高速な運動計測手法～構成要素の設計と計測精度に関する検討～”, 第 14 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 2599-2603, 2013.

謝辞

博士前期課程 2 年間を通して、授業、研究活動や就職活動等の助言、研究室の運営など多岐に渡り、熱心にご指導いただいた野嶋琢也准教授に厚く御礼申し上げます。私が学部 4 年だった頃には想像もできなかった成果を出し、研究を大きく進展させることができたのも野嶋先生のご指導によるものです。また、計測自動制御学会の投稿・発表の際には、台湾旅行中にも関わらず校正していただいたほか、現地でも発表練習をさせていただき、大変お世話になりました。

野嶋研究室と同じ対話型システム講座の小池英樹教授、佐藤俊樹助教をはじめとした、小池研究室の皆様にも大変お世話になりました。研究に関するご指摘やご助言を頂き、心より御礼申し上げます。

野嶋研究室の皆様には、研究もそれ以外のことでもお世話になりました。研究について助言し合ったり、授業や提出物で助け合ったり、IVRC でデスマーチを共に乗り越えたりと、非常に充実した学生生活を送ることができました。ここに御礼申し上げます。