

47057



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOMETRİK STEREO
METODU İLE YÜZEY ŞEKLİ
ELDE ETME**

Elek.Müh. Hüseyin BASMACI

**F.B.E. Bilgisayar Bilimleri Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Selim AKYOKUŞ

İSTANBUL, 1995

İÇİNDEKİLER :

| | |
|--|-----|
| İÇİNDEKİLER | i |
| ŞEKİL LİSTESİ | ii |
| TEŞEKKÜR | v |
| TÜRKÇE ÖZET | vi |
| YABANCI DİLDE ÖZET | vii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. YÜZEY YÖNÜ | 2 |
| 3. YANSITMA HARİTASI | 4 |
| Yansıtma Haritası Teknikleri | 8 |
| 4. FOTOMETRİK STEREO | 9 |
| 4.1 Liner Aydınlanma Eşitliği | 9 |
| 4.2. Non-Liner Aydınlanma Eşitliği | 10 |
| 4.3. Genel Durum | 11 |
| 4.3.1. Minimizasyon Kullanımı | 11 |
| 4.3.2. Bakma Tablosu Kullanımı | 13 |
| 5. FOTOMETRİK STEREO UYGULAMASI | 15 |
| 5.1. Liner Resim Aydınlanma Eşitliği | 16 |
| 5.2. Non-Liner Resim Aydınlanma Eşitliği | 18 |
| 6. İĞNE DİAGRAMI VE DERİNLİK ELDE ETME | 22 |
| 7. DOĞRULUĞUN İNCELENMESİ | 25 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 28 |
| KAYNAKLAR | 38 |
| ÖZGEÇMİŞ | |

ŞEKİL LİSTESİ :

- Şekil 2.1 : Yüzey normal vektörü o noktadaki iki ayrı tanjantın çarpımına paraleldir. 2
- Şekil 3.1 : Perspektif projeksiyon. Resimin ters oluşmaması için resimleme düzleminin mereğin arkasında değil önünde olduğunu varsaymak daha uygundur. 4
- Şekil 3.2 : Ortografik projeksiyon. Gözlenen objenin büyüklüğü bakış uzaklığı ile karşılaştırıldığında küçük ise resim projeksiyonu ortografik projeksiyon olarak modellenir. 4
- Şekil 3.3 : g , y ve f açılarının tanımlanması. Geliş açısı g , ışık kaynağından gelen ışın ile yüzey normali arasındaki açıdır. Yansıtma açısı y , gözlemci ile yüzey normali arasındaki açıdır. Faz açısı f ışık kaynağıda gelen ışın ile yansıyan ışın arasındaki açıdır. 5
- Şekil 3.4 : Lambertian yüzeye ait yansıtma haritası $R_a(p,q)$ nun sabit parlaklık konturları gradyant uzayında yuvarlak halkalar şeklindedir. $p_s=0.7$, $q_s=0.3$ ve $r=1$ için yansıtma haritası 0.1 birim aralıklı konturlar şeklinde çizilmiştir. 6
- Şekil 3.5 : Yansıtma haritası $R_b(p,q)$ nun sabit parlaklık konturlarının gradyant uzayında paralel düz doğrulardır. $p_s=0.7$, $q_s=0.3$ ve $r=1$ için yansıtma haritası 0.2 birim aralıklı konturlar şeklinde çizilmiştir. 7
- Şekil 4.1 : Fotometrik stereo yüzey şekli elde edilmek için hızlı ve sağlam bir metottur. Hesaplamalar ölçülen parlaklık bilgilerine göre indekslenmiş bakma tablosu şekline indirgenebilir. 14
- Şekil 5.1 : Verilen bir (x, y) resim noktasındaki yüzey yönünü (p, q) 'nun bulunması. Farklı resimlerdeki (x, y) noktasına ait aydınlanma değerlerine karşılık gelen yansıtma haritası konturları kesleştirilmiştir. $E_1(x, y) = 1.042$ ve $E_2(x, y) = 0.646$. 16
- Şekil 5.2 : Verilen bir (p, q) yüzey yönüne sahip (x, y) resim noktalarının bulunması. (p, q) noktasında iki farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen iki resim aydınlatma konturu kesleştirilmektedir. $R_1(p, q) = 0.397$ ve $R_2(p, q) = 0.955$. 17
- Şekil 5.3 : Yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan (x, y) resim noktalarının bulunması. $(0, 0)$ noktasında iki farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen iki resim aydınlatma konturu kesleştirilmektedir. Faz açısı f sabit kalmak şartı ile aydınlatma yönü değiştirildiğinde $(0,0)$ daki yansıtma haritası değerinin değişmediğine dikkat ediniz. $R_1(p, q) = R_2(p, q) = 0.796$. 18
- Şekil 5.4 : Verilen bir (x, y) resim noktasındaki yüzey yönünü (p, q) 'nun bulunması. Farklı resimlerdeki (x, y) noktasına ait aydınlanma değerlerine karşılık gelen yansıtma haritası konturları kesleştirilmiştir. $E_1(x, y) = 0.941$, $E_2(x, y) = 0.724$ ve $E_3(x, y) = 0.490$. 19
- Şekil 5.5 : Verilen bir (p, q) yüzey yönüne sahip (x, y) resim noktalarının bulunması. (p, q) noktasında üç farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen üç resim aydınlatma konturu kesleştirilmektedir. $R_1(p, q) = 0.324$, $R_2(p, q) = 0.699$ ve $R_3(p, q) = 0.924$. 20
- Şekil 5.6 : Yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan (x, y) resim noktalarının bulunması. $(0, 0)$

noktasında üç farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen üç resim aydınlatma konturu kesiktirilmektedir. Faz açısı f sabit kalmak şartı ile aydınlatma yönü değiştirildiğinde (0,0) daki yansıtma haritası değerinin değişmediğine dikkat ediniz.

$$R_1(p, q) = R_2(p, q) = R_3(p, q) = 0.796. \quad 21$$

şekil 6.1 : Photometric stereo dahil bir çok makina görme metodu yüzey şekil bilgisini yüzey yönünün her resim noktası için verildiği iğne diagramı şeklinde oluşturur. Bir küreye ait yüzey şekil bilgisinin iğne diagramı şeklinde gösterimi. 22

şekil 6.2 : Bir küreye ait yüzey şekil bilgisinin derinlik haritası şeklinde gösterimi. 22

şekil 6.3 : Eğer yüzey yönü biliniyorsa, yüzeyin bir referans düzlemine göre yüksekliği eğriler boyunca integre edilerek bulunabilir. Kapalı bir eğri boyunca yükseklikteki toplam değişim sıfır olduğundan dolayı, Yüzey gradyanının kapalı bir eğri boyunca integrali sıfır olmalıdır. 23

şekil 7.1 : $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma haritası şeklindeki $R(p, q)$ 'nun $p_s = 6.791$, $q_s = 2.910$, $r=1$ için çizilmiş 0.1 birim aralıklı yansıtma haritası konturları. şekil 3.4 'ten farklı olarak faz açısı 45° arttırılmıştır. Faz açısının arttırılması gradyan uzayının bir bölümüne zarar vererek bağlı bölgelerdeki yansıtma haritası konturlarının yoğunluğunu arttırmaktadır. 25

şekil 7.2 : $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma haritası şeklindeki $R_1(p, q)$ ve $R_2(p, q)$ 'nin sırasıyla $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $p=1$ ve $p_s = -0.3$, $q_s = 0.7$, $r=1$ için üst üste çizilmiş halleri. Her bir bölge, resim aydınlatma ölçümündeki hatanın yüzey gradyanı (p, q) hesaplanmasında nasıl bir hata oluşturacağını göstermektedir. 26

şekil 7.3 : $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma haritası şeklindeki $R_1(p, q)$ ve $R_2(p, q)$ 'nin sırasıyla $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $p=1$ ve $p_s = -0.3$, $q_s = 0.7$, $r=1$ için üst üste çizilmiş halleri. Her bir bölge, resim aydınlatma ölçümündeki hatanın yüzey gradyanı (p, q) hesaplanmasında nasıl bir hata oluşturacağını göstermektedir. 27

şekil 8.1 : Resim aydınlatma eşitliklerinin liner olduğu durumda, $R_b(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$ ve $p_s = -0.3$, $q_s = 0.7$ için elde edilmiş giriş resimleri. 29

şekil 8.2 : şekil 8.1 'de ki giriş resimleri için elde edilen yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi. 30

şekil 8.3 : Elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğinin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimi. 30

şekil 8.4 : Resim aydınlatma eşitliklerinin non-liner olduğu durumda, $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $p_s = -0.610$, $q_s = 0.456$ ve $p_s = -0.090$, $q_s = -0.756$ için elde edilmiş giriş resimleri. 31

şekil 8.5 : şekil 8.4 'te ki giriş resimleri için elde edilen yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi. 31

şekil 8.6 : Resim aydınlatma eşitliklerinin non-liner olduğu durumda, $R_a(p, q)$ ile karakterize

- edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $ps = 0.7$, $qs = 0.3$, $ps = -0.610$, $qs = 0.456$ ve $ps = -0.090$, $qs = -0.756$ için elde edilmiş giriş resimleri.32
- Şekil 8.7 : Şekil 8.6 'da ki giriş resimleri için yüzey düzgünlüğü koşulu altında bir hata minimizasyonuna dayalı iteratif yöntem ile elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi. 32
- Şekil 8.8 : Resim aydınlanma eşitliklerinin non-liner olduğu durumda, $Ra(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $ps = 0.7$, $qs = 0.3$, $ps = -0.610$, $qs = 0.456$ ve $ps = -0.090$, $qs = -0.756$ için 40 adet renk kullanılarak elde edilmiş giriş resimleri gösterilmektedir. 33
- Şekil 8.9 : Bu giriş resimleri için bakma tablosu kullanılarak elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi. 33
- Şekil 8.10 : sırasıyla $ps = 0.707$, $qs = -0.707$, $ps = -0.707$, $qs = -0.707$ ve $ps = -0.707$, $qs = 0.707$ ile aydınlatılmış insan yüzü resimleri. 34
- Şekil 8.11 : İnsan yüzü resimleri için elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi. 34
- Şekil 8.12 : Elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğinin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimi. 35
- Şekil 8.13 : sırasıyla $ps = 0.707$, $qs = -0.707$, $ps = -0.707$, $qs = -0.707$ ve $ps = -0.707$, $qs = 0.707$ ile aydınlatılmış vazo resimleri. 36
- Şekil 8.14 : vazo resimleri için elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi. 36
- Şekil 8.15 : Elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğinin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimi. 37

TEŞEKKÜR :

Tez çalıőmamın baőından itibaren verdiği destek ve yardımlarından dolayı tez danıőmanım Y.Doç.Dr. Selim AKYOKUŞ 'a teőekkürtü bir borç bilirim. Ayrıca, Yapıcı katkılarından dolayı Bilgisayar Bilimleri Mühendisliği Baőkanı Prof. M.Yahya KARSLIGİL 'e ve Y.Doç.Dr Ergun AKLEMAN 'a , yazıcı imkânı sağlıyan Adil BELLİSAN 'a ve Sonuç kısmındaki yüz ve vazo resimlerini sağlıyan Ramazan SEZER 'e teşekkür etmek istiyorum.



ÖZET :

Bilgisayara dayalı resim anlaşılması üzerindeki çalışmalar resimleme işlemini modellemeye ihtiyaç doğurmuştur. Bir resimdeki kaydedilmiş ışınma değerlerinin objenin şekliyle ilişkilendirilmesi yüzeylerin ışığı yansıtma şeklinin modellenmesini gerektirir.

Yüzey yansıtmasının gelen ve yansıyan ışınların geometrisine detaylı bağımlılığı iki yönlü yansıtma dağılım fonksiyonu ile verilmektedir. Yansıtma haritası bu fonksiyondan ve ışık kaynaklarının dağılımından türetilir. Yansıtma haritası yüzey yönü ile parlaklığı arasındaki ilişkiyi açıkladığı için kullanışlıdır. Yüzey yönünün parlaklık bilgisinden elde edilmesinde kritik öneme sahiptir. Pratikte yansıtma haritasının iki yönlü yansıtma dağılım fonksiyonundan hesaplanması yerine, şekli bilinen bir kalibrasyon objesi kullanılarak deneysel olarak saptanabilir.

Yansıtma haritası , sabit ortam aydınlanmasını, yüzey yansıtmasını ve resimleme geometrisini birleştirerek yüzey aydınlanmasını , yüzey yönünün bir fonksiyonu olacak şekilde yazılabilmesine imkan veren tek bir model içinde birleştirmek için uygun bir yoldur. Bu fonksiyon terse çevrilemez. Bunun nedeni yüzey yönü iki serbestlik derecesine sahipken resim aydınlanma değerinin sadece bir sınır koşul sağlamasıdır. Bu nedenle genelde tek bir resim noktasından kaydedilmiş aydınlanma değerinden yüzey şekli saptanamaz. Objenin şeklinin saptanması için ek bilgi sağlanmalıdır.

Yüzey yönünden ışımaya ve $R(p,q)$ ile verilen tek bir haritalama vardır. Ters haritalama ise tek değildir. Sonsuz sayıda yüzey yönü aynı parlaklığı verir. Yansıtma haritasının bir sabit parlaklık konturu bu çeşit yüzey yönlerini yansıtma haritasında birleştirir. Lokal bir noktaya ait yüzey yönü, gradyant uzayında farklı yansıtma haritalarına ait sabit parlaklık konturlarının kesişimine karşı gelmesi gerçeğinden yola çıkarak o noktaya ait aydınlanma değerlerinden hesaplanmaktadır.

Bu gözlem bizi yüzey yönünün bir veya daha fazla resimden elde edildiği Fotometrik stereo olarak adlandırılan yeni bir tekniğe götürmüştür. Fotometrik stereo fikri bakış yönünü sabit tutarken peşpeşe alınan resimler arasında gelen ışığın yönünün değiştirilmesidir. Gelen ışığın yönünün değiştirilmesi resimleme durumunu karakterize eden yansıtma haritasını değiştirmek içindir.

Fotometrik stereo metodu kullanılarak hesaplanan bitişik resim noktalarındaki gradyant değerlerinin benzer olması gerekmektedir. Düz bir yüzey durumunda bile ölçme hatalarından dolayı beklenen yüzey yönlerinde kararsızlıklar olabilmektedir. Eğer yüzeyin düzgün olduğunu biliyorsak fotometrik stereo sonuçlarını bu koşul altında geliştirebiliriz.

Fotometrik stereo, birkez kalibre ederek bir bakma tablosuna yada bir arama işlemine indirgenebilir. Bunlar hızlı ve verilen parlaklıklar sınırlı doğrulukta ölçüle bildiğinden dolayı yeterli doğrulukta sonuçlar sağlarlar.

Fotometrik stereo dahil bir çok makine görme metodu yüzey şekil bilgisini yüzey yönünün her resim noktası için verildiği iğne diagramı şeklinde oluşturur. Bağlı durumlarda yüzey şeklini değişik bir yolla sunmak isteriz. Genelde istenen şey bir referans düzlemine göre derinliği veren derinlik haritasıdır.

ABSTRACT :

Work on computer based image understanding has led to a need to model the imaging process. Relating the radiance values recorded in an image to object shape requires a model of the way surfaces reflect light.

Detailed dependence of surface reflection on the geometry of incident and emitted rays is given by the bidirectional reflectance distribution function. The reflectance map can be derived from that function and distribution of light sources. The reflectance map is useful because it makes explicit the relationship between surface orientation and brightness. It is of critical importance in recovering surface orientation from measurements of brightness. In practice, one can determine the reflectance map experimentally, using a calibration object of known shape, rather than computing it from the bidirectional reflectance distribution function.

The reflectance map is a convenient way to incorporate fixed scene illumination, surface reflectance and imaging geometry into a single model that allows image irradiance to be written as a function of surface orientation. This function is not invertible since surface orientation has two degrees of freedom and the measurement of image irradiance provides only one constraint. In general, local surface shape cannot be determined from the irradiance value recorded at single image point. In order to determine object shape, additional information must be provided.

There is unique mapping from surface orientation to radiance given by the reflectance map $R(p, q)$. The inverse mapping is not unique. An infinite number of surface orientations give rise to the same brightness. A contour of constant brightness connects such a set of orientations in the reflectance map. The surface orientation of a local point is determined by its irradiances by using the fact the orientation corresponds to the intersection of constant brightness contours of different reflectance maps on the gradient space.

This observation has led to a novel technique called photometric stereo in which surface orientation is determined from two or more images. The idea of photometric stereo is to vary the direction of the incident illumination between successive images, while holding the viewing direction constant. The effect of varying the direction of incident illumination is to change the reflectance map that characterizes the imaging situation.

The gradient values computed at adjacent image points using photometric stereo method must be similar. Even in the case of a planar surface, there can be fluctuations in estimated surface orientation due to measurement errors. If we know that the surface is smooth then we can improve the results of the photometric stereo under this constraint.

Once calibrated, Photometric stereo can be reduced to simple lookup tables or search operations. They provide rapid results and adequate accuracy, hence given brightness can only be measured with limited accuracy.

Several machine vision methods, including photometric stereo, produce surface shape information in the form of a needle diagram, in which surface orientation is given for every picture cell. In some cases we may want to represent surface shape in a different way. Often desirable form is a depth map, in which height is given above a reference plane.

1. GİRİŞ.

Görme en karmaşık ve en güçlü duyumuzdur. Bu duyumuz bize etrafımızdakiler hakkında oldukça fazla bilgi vererek fiziksel bir temas olmaksızın çevremiz içinde akıllı bir şekilde hareket etmemizi sağlar. Onun vasıtasıyla nesnelere özelliklerini, yerlerini ve birbirleri arasındaki ilişkileri öğreniriz. Görme duyumuzdan mahrum kalmamız bizi büyük ölçüde sınırlar. Bu nedenle bilgisayarların yaygınlaşmasından itibaren makinelerle görme duyusu kazandırılmaya çalışılması doğaldır.

Objenin resminden yüzey bilgisini elde etmeyi hedefleyen gölgeden şekil çıkartma problemi bilgisayar görüntüsünün belli başlı problemlerinden biridir. Geliştirilen birçok gölgeden şekil çıkartma yöntemi tek resim kullanmakla birlikte problemin kötü koşullu olmasından dolayı sonuçlar güvenilir olmamaktadır. Bu nedenle sağlıklı olarak yüzey elde edilmesi için ek bilgi sağlamak amacı ile birden fazla resim kullanan yöntemlerle ilgilenilmiştir.

Fotometrik stereo fikri bakış doğrultusunu sabit tutarken alınan peşpeşe resimler arasında aydınlanma yönünün değiştirilmesidir. Fotometrik stereo metodu ilk olarak Woodham (1980) tarafından ortaya atılmıştır ve daha sonra başkaları tarafından analiz edilerek geliştirilmiştir. Lokal bir noktadaki yüzey yönü, yüzey yönünün gradyant uzayındaki farklı yansıtma haritalarına ait sabit parlaklık konturlarının kesişimine karşı gelmesi gerçeğinden yola çıkarak o noktaya ait aydınlanma değerlerinden hesaplanmaktadır. Yüzey yönlerinin nokta nokta hesaplanması lokal bir metot olduğundan bu yöntem düzgün yüzey ve sabit yansıtma katsayısı sınır koşulları olmadan uygulanabilir. Bununla beraber bu yöntem gürültülere karşı hassastır.

Bu çalışmada ilk olarak resimleme işlemi incelenerek yansıtma haritası tanıtılmaktadır. Fotometrik stereo yöntemi resim aydınlatma eşitliklerinin lineer ve non-lineer olduğu durumlarda ve genel durumda bir hata minimizasyonu ve bakma tablosu kullanımı için incelenmekte ve fotometrik stereo uygulamaları örneklerle açıklanmaktadır. Ayrıca aydınlanma şartlarının yöntemin doğruluğunu nasıl etkilediği incelenmektedir.

2. YÜZEY YÖNÜ.

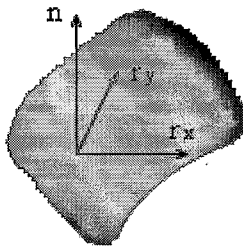
Düzgün bir yüzey her nokta için bir tanjant düzlemine sahiptir. Bu tanjant düzlemin yönü yüzeyin bu noktadaki yönünü temsil etmek için alınacaktır. Tanjant düzleme dik birim vektör olan yüzey normali bu düzlemin yönünü belirlemek için uygundur. Normal vektör üç bileşen ve bir koşula (bileşenlerin karelerinin toplamı 1'e eşit olmalıdır) sahiptir.

Alternatif olarak bu vektörün kuyruğunu gaussian küre denen bir kürenin merkezine konduğunu hayal edebiliriz. Vektörün başı yüzeye belirli bir noktadan değer bunu yüzey yönünü göstermek için kullanabiliriz. Küre üzerindeki bu nokta koordinatları iki değişkenle belirlenebilir. (enlem ve boylam gibi).

Koordinat sistemini yapılan ölçümlere rölaf olarak sabitlemeliyiz. Bu koordinat sisteminin bir eksenini görme sisteminin optik eksenine bağlanacak şekilde seçilmesi uygun olacaktır. Bu sistemin merkezini merceğin merkezine iki eksen resim düzlemine paralel olacak şekilde yerleştirebiliriz.

Yüzeyin bir parçası şimdi onun mercek düzleminden (yada buna paralel olan herhangi bir referans düzlemden) dik farkı $-z$ ile tanımlanabilir. Bu fark yan yerleşmeye (x, y) 'e bağlı olacaktır. Bundan sonra yapmak istediğimiz şey yüzey normalini z ve z in sırasıyla x ve y ye göre kısmi türevleri cinsinden yazmaktır.

Yüzey normali yüzeyin tanjant düzlemindeki bütün doğrulara diktir. Sonuç olarak bu tanjant düzlemindeki paralel olmıyan iki doğrunun vektörel çarpımı ile bulunabilir. z 'in sırasıyla x ve y 'ye göre kısmi türevleri için p ve q kısaltmalarını kullanacağız. Böylece p , x yönünde ölçülen yüzeyin eğimi, q da y yönünde ölçülen yüzeyin eğimidir. p ve q nun yüzey parçası yönü ile ilgisi Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Eğer x yönünde bx uzunluğu kadar küçük bir adım alırsak yükseklik $p bx$ kadar değişir. Benzer şekilde y yönündeki by uzunluğu kadar küçük bir adım $q by$ yüksekliği kadar değişime yol açar.



Şekil 2.1 : Yüzey normal vektörü o noktadaki iki ayrı tanjantın çarpımına paraleldir.

İlk küçük adım vektörünü $(bx, 0, p - bx)$ şeklinde yazabiliriz. Böylece bu vektöre paralel olan doğru

$$r_x = (1, 0, p)$$

tanjant düzleminde (x, y) de uzanır. (\sim vektör transpozunu temsil etmektedir). Benzer şekilde

$$r_y = (0, 1, q)$$

paralel olan bir doğruya tanjant düzleminde uzanır. Bir yüzey normali bu iki doğrunun vektörel çarpımı ile bulunabilir. Normalin gözlemciye yada gözlemciden dışarı doğru gösterilmesi bizim kararımıza kalmaktadır. Eğer gözlemciye doğru olmasını istersek, şunu elde ederiz

$$n = r_x * r_y = (-p, -q, 1) \quad (2.1)$$

p ve q sırasıyla x ve y yönündeki eğimler olduklarından (p, q) 'nun yüzey gradyanı olarak adlandırılması oldukça uygundur. Ve gradyant uzayı bu tip (p, q) noktalarından oluşmuş iki boyutlu bir uzaydır. Gradyant uzayı yüzey yönü gösterimi için uygun bir yol sağlamaktadır. Bu durumda birim yüzey normalini

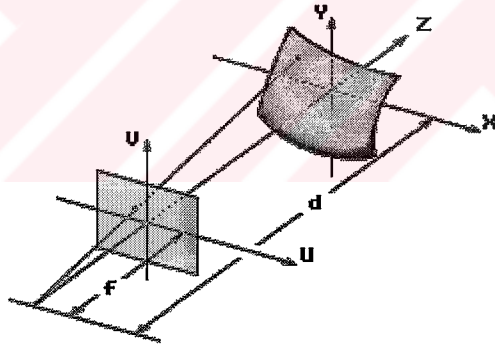
$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} = \frac{(-p, -q, 1)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edebiliriz.

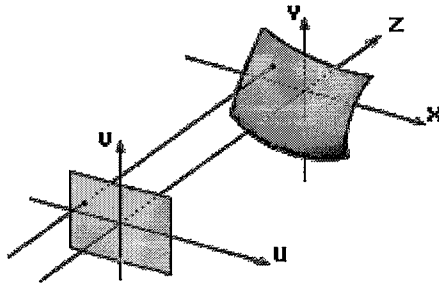
3. YANSITMA HARİTASI

Verilen bir yönde obje yüzeyi tarafından yansıtılan ışık oranı yüzey malzemesinin optik özelliklerine, yüzey mikro yapısına, gelen ışığın özelliğine, spektral dağılımına ve polarizasyon durumuna bağlıdır. Birçok yüzey için gelen ışığın belirli bir yönde yansıtılması oranı sadece yüzey yönüne bağlıdır (Nayar et al, 1990). Yansıtma haritası yüzey normal yönü ile parlaklığı arasındaki ilişkiyi açık hale getirir. Yüzey yansıtma özellikleri ve ışık kaynağı dağılımları hakkındaki bilgiyi açıklar. Resimlerden yüzey şeklini çıkartma metotlarını geliştirmede kullanılan gösterilebilir bir araçtır. Sonuç $R(p,q)$ ile gösterilen yansıtma haritasıdır. Yansıtma haritası objenin yüzey malzemesine ve ışık kaynaklarının dağılımına bağlıdır.

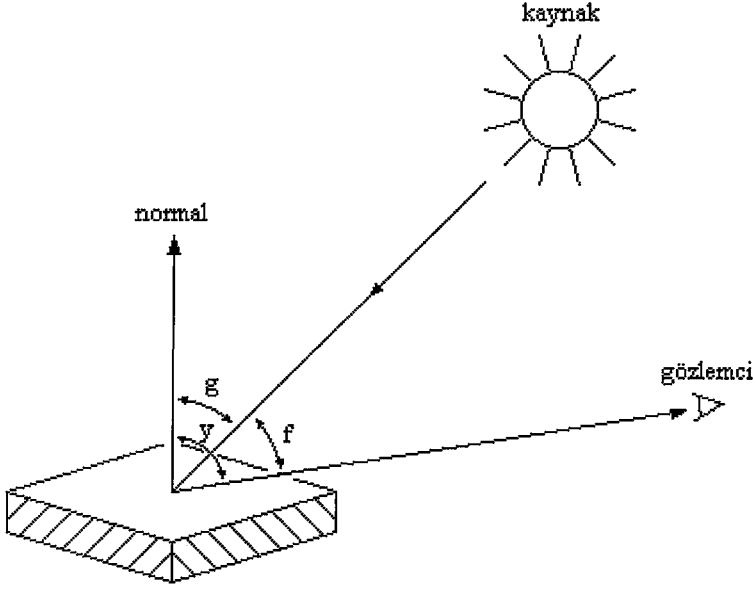
Genellikle $R(p,q)$ yüzeyini gradyant (p,q) 'nun bir fonksiyonu olarak çizmek uygun olur. $p-q$ düzlemi gradyant uzayı olarak adlandırılır ve bunun her noktası belirli bir yüzey yönüne karşılık gelir. Örneğin merkezdeki nokta bakış doğrultusuna dik bütün yüzeylerin yüzey normal yönünü temsil etmektedir. Gradyant uzayında konturlardan oluşmuş bir harita yansıtma haritasını tanımlamak için kullanılabilir.



Şekil 3.1 : Perspektif projeksiyon. Resimin ters oluşmaması için resimleme düzleminin merceğin arkasında değil önünde olduğunu varsaymak daha uygundur.



Şekil 3.2 : Ortografik projeksiyon. Gözlenen objenin büyüklüğü bakış uzaklığı ile karşılaştırıldığında küçük ise resim projeksiyonu ortografik projeksiyon olarak modellenir.



Şekil 3.3 : g , y ve f açılarının tanımlanması. Geliş açısı g , ışık kaynağından gelen ışın ile yüzey normali arasındaki açıdır. Yansıma açısı y , gözlemci ile yüzey normali arasındaki açıdır. Faz açısı f ışık kaynağıda gelen ışın ile yansıyan ışın arasındaki açıdır.

Eğer gözlenen objenin büyüklüğü bakış uzaklığı ile karşılaştırıldığında küçük ise perspektif projeksiyon (Şekil 3.1), ortografik projeksiyona (Şekil 3.2) yaklaştırılabilir. Biz ortografik projeksiyon yapan resim oluşturma sistemi ile ilgileneceğiz. Resimleme geometrisini standartlaştırmak için bakış doğrultusunun iki eksenini ile çakıştırılan bir koordinat sistemi seçmemiz uygun olacaktır. Bu sistemin merkezini merceğin merkezine iki eksen resim düzlemine paralel olacak şekilde yerleştirebiliriz.

Işık kaynaklarının yerlerini, Objenin büyüklüğüne göre objeden çok uzakta olduğunu varsayarak bunların her birini sabit bir vektör olarak alabiliriz. Bu vektöre eş bir yüzey yönü mevcuttur. Bu ışık kaynağından gelen ışıklara dik olarak yerleştirilmiş bir yüzeydir. Eğer bu yüzeyin normali $(-ps, -qs, 1)$ ise (ps, qs) gradyantı kaynak yönünün tespiti için kullanılabilir. Bundan sonra ışık kaynağının ve gözlemcinin resimlenen objeden çok uzakta olduğunu farzedeceğiz.

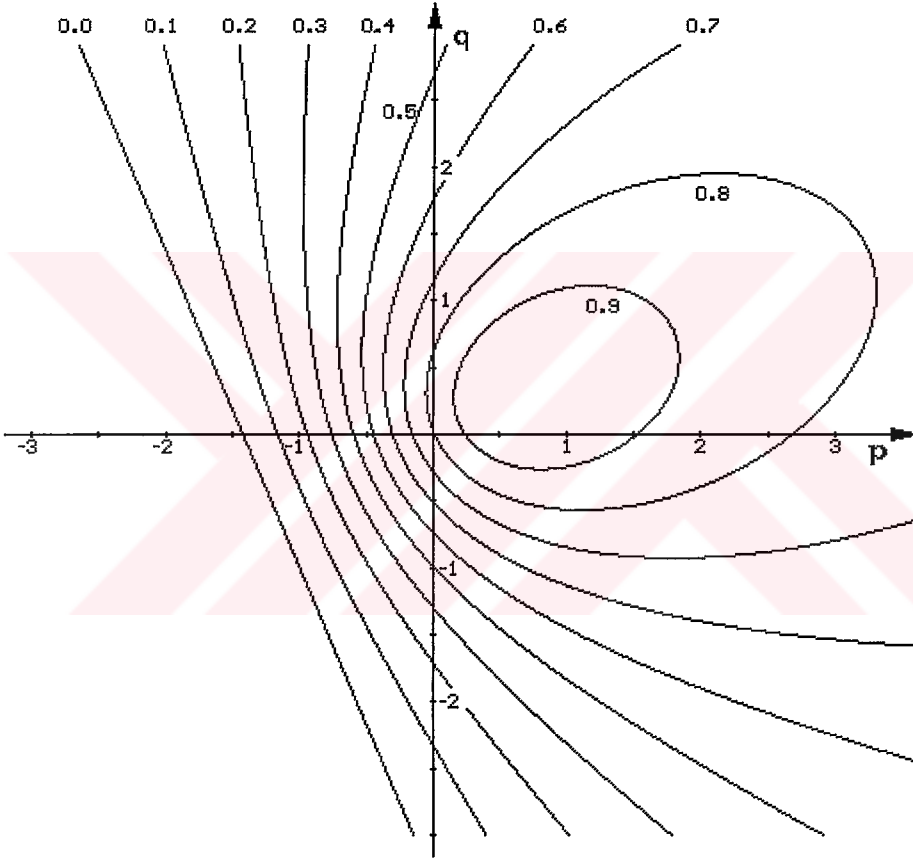
Şekil 3.3 ' de tanımlandığı gibi, geliş açısı g , yansıma açısı y ve faz açısı f olmak üzere, $\cos(g)$, $\cos(y)$ ve $\cos(f)$ için ifadeler yüzey normal vektörü $(-p, -q, 1)$, ışık kaynağının yönünü gösteren vektör $(-ps, -qs, 1)$ ve gözlemcinin yönünü gösteren $(0, 0, 1)$ vektörünün normalize edilmiş nokta işlemlerinden türetilebilir.

$$\cos(g) = \frac{1 + ps + qs}{\sqrt{1+p^2+q^2} \sqrt{1+ps^2+qs^2}} \quad (3.1)$$

$$\text{Cos}(y) = \frac{1}{\text{sqrt}(1+p^2+q^2)} \quad (3.2)$$

$$\text{Cos}(f) = \frac{1}{\text{sqrt}(1+ps^2+qs^2)} \quad (3.3)$$

Bu ifadeler her hangi bir $F(g, y, f)$ yüzey yansıtma fonksiyonunu $R(p,q)$ Yansıtma haritası şekline çevirmek için kullanılabilir.



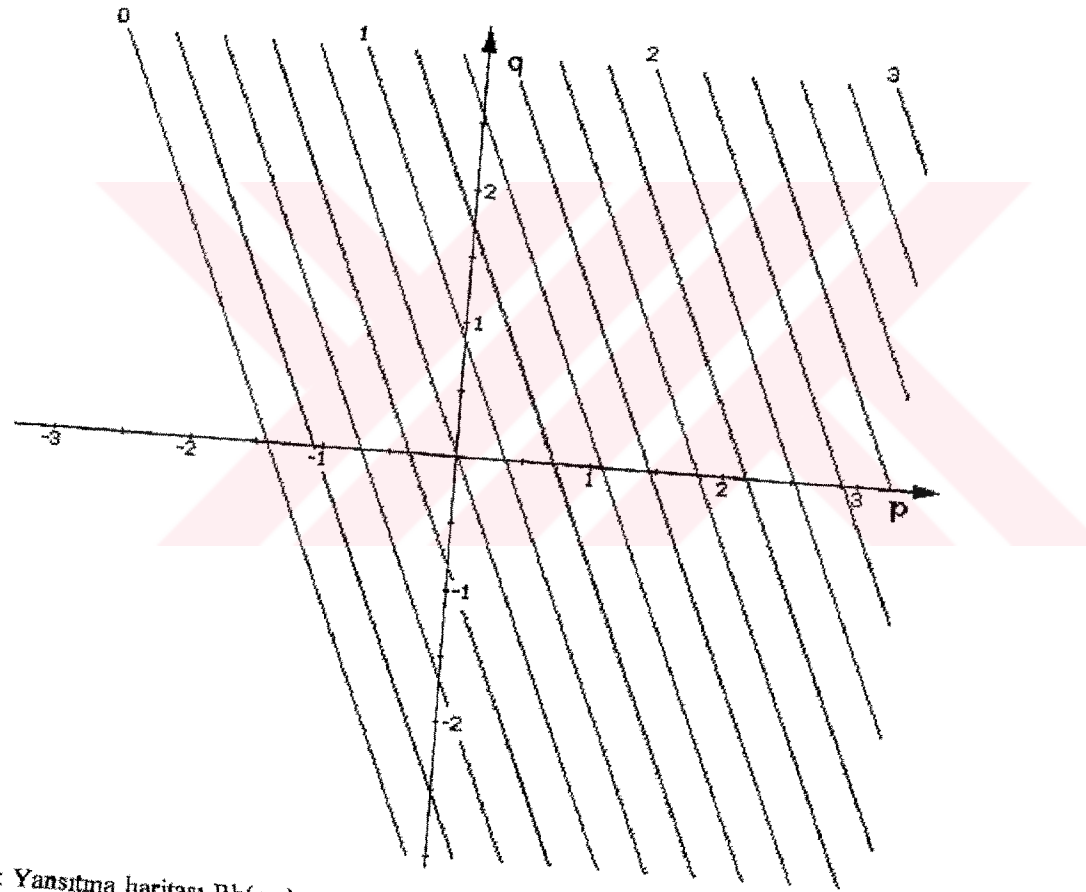
Şekil 3.4 : Lambertian yüzeye ait yansıtma haritası $R_a(p,q)$ nun sabit parlaklık konturları gradyant uzayında yuvarlak halkalar şeklindedir. $ps=0.7$, $qs=0.3$ ve $\rho =1$ için yansıtma haritası 0.1 birim aralıklı konturlar şeklinde çizilmiştir.

Bir idealleştirilmiş yüzey yansıtma modeli şöyle verilmektedir

$$F(g, y, f) = \rho \text{Cos}(g), \quad \text{Cos}(g) \geq 0$$

Bu yansıtma fonksiyonu bütün bakış doğrultularından eşit olarak parlak görünen mükemmel mat (Lambertian) yüzeye ait bilimsel modele karşılık gelmektedir. Burada ρ yansıtma faktörüdür. İlgili yansıtma haritası:

$$R_a(p, q) = \rho \frac{1 + p s p + q s q}{\sqrt{1+p^2+q^2} \sqrt{1+p s^2+q s^2}}, \quad (1 + p s p + q s q) \geq 0 \quad (3.4)$$



Şekil 3.5 : Yansıtma haritası $R_b(p, q)$ nun sabit parlaklık konturlarının gradyant uzayında paralel düz doğrulardır. $p_s=0.7$, $q_s=0.3$ ve $\rho=1$ için yansıtma haritası 0.2 birim aralıklı konturlar şeklinde çizilmiştir.

Kayalık gezegenlerin yüzeylerindeki ve ay lekeleri üzerindeki malzemelerin yansıtma özelliklerine ilk yaklaşım olarak her yönde eşit miktarda ışına yapan bir yüzey düşünelim.

$$F(g, y, \theta) = \rho \frac{\cos(g)}{\cos(y)}, \quad \cos(g) \geq 0$$

ilgili yansıtma haritası

$$R_b(p,q) = \rho \frac{1 + ps p + qs q}{\text{sqrt}(1 + ps^2 + qs^2)}, \quad (1 + ps p + qs q) \geq 0 \quad (3.5)$$

buluruz. Bu yansıtma fonksiyonunun sabit parlaklık konturları paralel düz doğrulardır.

$R(p, q)$ yu gradyant uzayında bir dizi eş-parlaklık konturları şeklinde göstermek uygundur. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 yukarıda tanımlanan yansıtma haritalarını $ps=0.7$, $qs=0.3$ ve $\rho =1$ için göstermektedir.

Yansıtma Haritası Teknikleri.

Yansıtma Haritasını kullanarak resim oluşturma işlemini tanımlayan temel eşitlik şöyle yazılabilir

$$E(x, y) = R(p,q) \quad (3.6)$$

bu eşitlik resim aydınlanma eşitliği olarak adlandırılmaktadır. Bu eşitliğin bir kullanım alanı yüzeylerin gölgeli resimlerinin oluşturulmasıdır.

Resim-aydınlanma eşitliği bununla beraber keza resim aydınlanmasından objenin şeklinin saptanması için resim analizinde de kullanılabilir. Bu eşitlik birinci dereceden nonliner kısmi diferansiyel eşitliktir. Direk çözümü usandırıcıdır (Horn, 1986). Daha genel olarak bu eşitliğin p ve q ya bağlı iki bilinmeyenli bir eşitlik olduğu düşünülebilir. Eşitliğin tanımlı olmamasından dolayı Obje şeklinin resim aydınlanmasından saptanması zordur. Obje şeklinin hesaplanması için ek varsayımlar yapılmalıdır. Ay lekesi malzemesi gibi bağzı malzemeler için yüzey yansıtmasının özel davranışları çözümü kolaylaştırmaktadır.

4. FOTOMETRİK STEREO

Fotometrik stereo fikri, bakış doğrultusunu sabit tutarken peşpeşe görüntüler arasında gelen ışığın yönünün değiştirilmesidir. Varsayalım $E1(x,y)$ ve $E2(x,y)$ resimlerini gelen ışığın yönünü değiştirerek elde etmiş olalım. Resimleme geometrisinde bir değişiklik yapılmadığından dolayı her resim elemanı (x,y) iki resim için aynı obje noktasına karşılık gelir ve bundan dolayı aynı gradyant (p,q) 'a karşılık gelir. Gelen ışığın yönünün değiştirilmesi resimleme durumunu karakterize eden yansıtma haritasını değiştirmek içindir.

Yansıtma haritası bilgisayar grafiğinde bir objenin şekil tanımından resminin elde edilmesinde oldukça kullanışlıdır. Fakat biz diğer yönde ilerlemek istiyoruz. Yani verilen bir resimden objenin şeklini çıkarabilmek istiyoruz. Yüzey yönünden ışımaya p ve q ile belirtilen ve $R(p,q)$ ile verilen tekbir haritalama vardır. Ters haritalama ise tek değildir. Sonsuz sayıda yüzey yönü aynı parlaklığı verir. $R(p,q)$ 'nun sabit bir konturu bu çeşit yüzey yönlerini yansıtma haritasında birleştirir. Bununla beraber genelde yüzey yönünün iki serbestlik derecesi varken parlaklığın sadece bir serbestlik derecesine sahip olmasından dolayı parlaklıktan yüzey yönüne geçişte haritalama tek olmayabilir.

4.1. Liner Resim Aydınlanma Eşitliği.

Resim aydınlanma eşitliğinin liner olduğu durumda yüzey yönünü lokal olarak bulmak için ek bilgiye ihtiyacımız vardır. p ve q gibi iki bilinmeyen bulmamız için iki denkleme ihtiyacımız vardır. Değişik aydınlanma koşullarında çekilmiş iki resim bizi her resim noktası için iki eşitliğe götürecektir. Yansıtma Haritaları $R1(p,q)$ ve $R2(p,q)$ olacak şekilde sırasıyla $E1(x,y)$ ve $E2(x,y)$ ye karşılık gelsin. Bu iki gözlem iki bağımsız eşitlikle karakterize edilebilir

$$E1(x,y) = R1(p,q) \quad (4.1)$$

$$E2(x,y) = R2(p,q) \quad (4.2)$$

Bu iki eşitliğin tanımlanması için İki yansıtma haritası $R1(p,q)$ ve $R2(p,q)$ gerekmektedir. Eğer bu eşitlikler liner ve bağımsız iseler p ve q için tekbir çözüm bulunacaktır. Farz edelim ki

$$R1(p,q) = \text{sqr}t \left[\frac{1 + p^2 + q^2}{r1} \right], \quad R2(p,q) = \text{sqr}t \left[\frac{1 + p^2 + q^2}{r2} \right]$$

burda

$$r1 = \text{sqr}t(1 + p^2 + q^2) \quad \text{ve} \quad r2 = \text{sqr}t(1 + p^2 + q^2)$$

ise

$$p = \frac{(E1^2r1 - 1)q2 - (E2^2r2 - 1)q1}{p1q2 - q1p2}, \quad q = \frac{(E2^2r2 - 1)p1 - (E1^2r1 - 1)p2}{p1q2 - q1p2} \quad (4.3)$$

$p1 / q1 < p2 / q2$ sağlanmaktadır. Böylece değişik aydınlanma koşullarında çekilmiş verilen iki ayrı resimden her nokta için tek bir yüzey yönü bulunabilir. Bu Fotometrik stereo metodunun bir göstergesidir. En iyi sonuç için iki ışık kaynağı yönünün gradyant uzayında uzak köşelerde olması gerekmektedir. Ek olarak $p1 / q1 < p2 / q2$ şartı bu yaklaşımın yer yüzünden çekilmiş teleskopik ay resimlerinde kullanılmasını engeller.

Yukarıda bahsedilen $Rb(p,q)$ ile karakterize edilen yansıtma için ve hiç şüphesiz karekökleri için bu eşitlikler p ve q için gerçekten lineerdir. Böylece yansıtma faktörü biliniyorsa resmin her noktasında yüzey yönünün saptanması için iki görünüş yeterli olmaktadır.

4.2. Non-Linear Resim Aydınlanma Eşitliği.

Genelde (4.1) ve (4.2) numaralı eşitlikler birden fazla çözümü olan non-linear eşitliklerdir. Çözümün elde edilmesi için bir fikir üçüncü bir resim kullanılmalıdır.

$$E3(x,y) = R3(p,q) \quad (4.4)$$

Yukarıda $Ra(p,q)$ ile karakterize edilen yansıtma durumunda her resim noktasında yüzey yönünün ve yansıtma faktörünün bulunabilmesi için üç görünüş yeterli olmaktadır (Horn, 1986). $E = (E1, E2, E3)^T$ her bir üç görünüşte (x,y) noktasında kaydedilmiş resim aydınlanma değerlerinin kolon vektörü olsun. Üç aydınlanma yönünü tanımlayan birim kolon vektörlerini satır kabul ederek S matrisini oluşturalım

$$S = \begin{bmatrix} s11, & s12, & s13 \\ s21, & s22, & s23 \\ s31, & s32, & s33 \end{bmatrix}$$

$n = (n1, n2, n3)^T$, (x,y) noktasındaki birim yüzey normaline karşılık gelen kolon vektörü olsun öyleyse

$$E = \rho S n$$

söyleki

$$\rho n = S^{-1} E$$

Bu durumda, (x, y) noktasındaki yansıtma faktörü ve birim yüzey normali

$$\rho = |S^{-1} E|$$

ve

$$n = \frac{1}{\rho} S^{-1} E \quad (4.5)$$

S matrisinin tersinin olması sağlanmalıdır. Bu tersin olması koşulu s1, s2 ve s3 vektörlerinin aynı düzlem üzerinde olmamasıdır. Malesef güneşin gökyüzünden geçen yolu yaklaşık olarak düzlemsel olduğundan bu basit çözüm aynı gün içinde farklı zamanlarda açık havada alınmış resimlere uygulanamaz.

4.3 Genel Durum.

4.3.1 Minimizasyon Kullanımı.

İnsanlar bir dergide basılan tek bir insan yüzü resimden yüz şekil özelliğini tahmin edebilirler. Bu yeterli bilginin olduğunu yada ek olarak kapalı varsayımlar tanımladığımızı gösterir. Bu varsayımlardan biri yüzeyin düzgün olduğudur. Bir çok yüzey düzgündür ve kısmi türevlerinde süreksizlikler yoktur. Düzgünlüğün varsayılması güçlü bir koşul sağlar. Yüzeyin komşu parçaları keyfi yönlü sayılamaz. Düzgün ve sürekli bir yüzey oluşturacak şekilde bir araya gelmelidirler. Böylece düzgünlük koşulunu kullanan genel bir metod hayal edilebilir.

Fotometrik stereo metodu kullanılarak hesaplanan bitişik resim noktalarındaki gradyant değerlerinin benzer olması gerekmektedir. Düz bir yüzey durumunda bile ölçme hatalarından dolayı beklenen yüzey yönlerinde kararsızlıklar olabilmektedir. Eğer yüzeyin düzgün olduğunu biliyorsak Fotometrik stereo sonuçlarını bu koşul altında geliştirebiliriz.

Amacımız resim aydınlanma eşitliğindeki $p(x, y)$ ve $q(x, y)$ fonksiyonlarını bulmaktır.

$$E(x, y) = R(p, q) \quad (4.6)$$

Keza düz bir yüzeye $p(x,y)$ ve $q(x,y)$ fonksiyonlarının karşılık gelmesini istiyoruz. Düzgünlüğü ölçmenin birçok yolundan p ve q nin hızlı değişimini cezalandırmanı seçebiliriz.

$$es = \iint_s ((px^2 + py^2) + (qx^2 + qy^2)) dx dy$$

integralini minimize edeceğiz. Burda px , py , qx ve qy sırasıyla p ve q 'nun x ve y 'ye göre birinci kısmi türevleridir.

Amacımız p ve q 'nun resim aydınlanma eşitliğini gerçekleştirmesi sınır koşulunda es 'yi

minimize etmektir. Pratikte hem aydınlanmanın ölçümünde hemde yansıtma haritasının saptanmasında hatalar vardır. $E(x,y)$ ve $R(p,q)$ eşitliğinde ısrar edilmesinin yerine hatayı minimize etmeyi deneyebiliriz.

$$e_i = \iint_s (E_i(x,y) - R_i(p, q))^2 dx dy$$

E_i burda i . resimde gözlenen resim aydınlanması ve R_i 'de ilgili yansıtma haritasıdır. O zaman genel olarak $e_s + \sum \lambda_i e_i$ 'yi minimize edeceğiz. Burda λ düzgünlüğe aykırılık ile resim aydınlanma eşitliğindeki hatalar arasında bir ağırlık parametresidir. Bu parametre parlaklık bilgisi çok doğruysa büyük, parlaklık bilgisi çok hatalı ise küçük seçilmelidir.

Eğer elimizde m adet resim varsa bu problemi şu minimizasyon şeklinde ifade edebiliriz.

$$e = \iint_s ((px^2 + py^2) + (qx^2 + qy^2)) dx dy + \sum_{i=1}^m \lambda_i \iint_s (E_i(x, y) - R_i(p, q))^2 dx dy \quad (4.7)$$

Bu integralin ayırık şeklini direk olarak minimize ederek nümerik bir metod geliştirebiliriz. $[x, y]$ noktasındaki düzgünlükteki farkı aşağıdaki gibi ölçeriz.

$$e_s [x, y] = \frac{1}{4} ((p [x+1, y] - p [x, y])^2 + (p [x, y+1] - p [x, y])^2 + (q [x+1, y] - q [x, y])^2 + (q [x, y+1] - q [x, y])^2)$$

resim aydınlanma eşitliğindeki hata aşağıdaki gibi verilmekte iken

$$e_i [x, y] = (E_i [x, y] - R_i(p [x, y], q [x, y]))^2$$

minimize edeceğimiz toplam

$$e = \sum_x \sum_y (e_s [x, y] + \sum_i \lambda_i e_i [x, y]) \quad (4.8)$$

Biz bu hatayı minimize edecek bir dizi $\{p [k, l]\}$ ve $\{q [k, l]\}$ değerlerini arıyoruz. e 'nin $p [k, l]$ ve $q [k, l]$ 'ye göre türevini alırsak

$$\frac{de}{dp [k, l]} = 2 (p [k, l] - p'' [k, l]) - 2 \sum_i \lambda_i (E_i [k, l] - R_i(p [k, l], q [k, l])) \frac{dR_i}{dp}$$

$$\frac{de}{dq [k, l]} = 2 (q [k, l] - q'' [k, l]) - 2 \sum_i \lambda_i (E_i [k, l] - R_i(p [k, l], q [k, l])) \frac{dR_i}{dq}$$

burda p'' ve q'' , p ve q 'nun lokal ortalamalarıdır.

$$p'' [i, j] = \frac{1}{4} (p [i+1, j] + p [i, j+1] + p [i-1, j] + p [i, j-1])$$

$$q'' [i, j] = \frac{1}{4} (q [i+1, j] + q [i, j+1] + q [i-1, j] + q [i, j-1])$$

e 'nin yukarıdaki türevinin sıfıra eşit olduğu yerde tepe noktası bulunacaktır. Sonuç eşitliği p [k, l] ve q [k, l] 'yi bulacak şekilde düzenlersek iteratif çözüm metodu ortaya çıkacaktır.

$$p [k, l]^{n+1} = p'' [k, l]^n + \sum_{i=1}^m \lambda_i (E_i [k, l] - R_i (p [k, l], q [k, l])) \frac{dR_i}{dp} \quad (4.9)$$

$$q [k, l]^{n+1} = q'' [k, l]^n + \sum_{i=1}^m \lambda_i (E_i [k, l] - R_i (p [k, l], q [k, l])) \frac{dR_i}{dq} \quad (4.10)$$

ızgaranın her bir noktasındaki p ve q 'nin yeni değerleri eski değerlerinin R(p,q), dR/dp ve dR/dq 'de kullanılmasıyla elde edilir. Eğer R(p,q) 'de lokal ortalamalar olan p'' ve q'' 'yi kullanırsak ve de λ yeterince ufaksa sağlam bir metod elde ettiğimizi söyleyebiliriz.

Yukarıdaki iteratif yöntem değişik yollarla geliştirilebilir. p ve q 'nun laplasyanları ile orantılı olan (p'' [k, l] - p [k, l]) ve (q'' [k, l] - q [k, l]) daha doğru bir formülle yer değiştirilebilir. Örneğin lokal ortalamalar şöyle hesaplanabilir

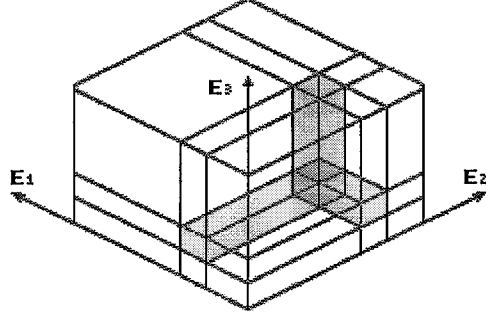
$$p'' [i, j] = \frac{1}{5} (p [i+1, j] + p [i, j+1] + p [i-1, j] + p [i, j-1])$$

$$+ \frac{1}{20} (p [i+1, j+1] + p [i+1, j-1] + p [i-1, j-1] + p [i-1, j+1])$$

ve aynı şekilde q'' [i, j] de hesaplanabilir. Ayrıca eşitlikler direk z derinlik bilgisi hesaplanacak şekilde düzenlenebilir (Tsai & Shah).

4.3.2 Bakma Tablosu Kullanımı.

Fotometrik Stereo probleminde kapalı şekilde bir çözüm bulmanın imkansız olduğu durumda yansıtma haritası deneysel olarak saptanabilir. Ayrıca kapalı şekilde bir çözüm bulunabilmiş olsa bile bu daima hesaplama çok uğraşı gerektirmektedir. Ölçülen parlaklık bilgilerine göre indekslenmiş bakma tabloları bu açmazda bir çözüm sunmaktadır. Şekil 4.1. Bunlar hızlı ve verilen parlaklık bilgisi sınırlı doğrulukta ölçülebildiğinden dolayı da yeterli doğrulukta sonuçlar sağlarlar.



Şekil 4.1 : Fotometrik stereo yüzey şekli elde edilmek için hızlı ve sağlam bir metottur. Hesaplamalar ölçülen parlaklık bilgilerine göre indekslenmiş bakma tablosu şekline indirgenebilir.

Bakma tablosu yansıtma haritası'nın verilen açık formülünden oluşturulabileceği gibi deneysel olarak doldurulabilir. Bir kalibrasyon objesi olarak küre gibi şekli bilinen bir obje resimlenir. Tablodaki bir girişi saptamak için değişik aydınlanma koşulları altında belirli bir noktadan alınmış gri seviyeler kullanılır. Yüzey yönü şekli bilinen obje kullanılarak hesaplanır ve tablodaki uygun yere girilir. Kalibrasyon objesinin örneklenmesinde ilgili yüzey yönüne sahip noktaya dokunulmadığında tabloda oluşan boşluklar interpolasyonla doldurulabilir.

5. FOTOMETRİK STEREO UYGULAMASI.

Fotometrik stereo iki şekilde kullanılabilir. Bunlardan ilki yüzey yönünün her resim noktasında bulunması için genel bir tekniktir. Verilen bir (x,y) resim noktası için her bir resmi karakterize eden resim aydınlanma eşitlikleri ilgili gradyant (p,q) yu bulmak için birleştirilebilir.

İkinci fotometrik stereo uygulaması belirli yüzey yönlerine sahip obje noktalarının bulunması için genel bir tekniktir. Fotometrik stereo 'nun bu kullanımı resim aydınlanma eşitliğinin x ve y bilinmeyenli bir eşitlik gibi yorumlanmasına karşılık gelir. Verilen gradyant (p,q) için her bir resmi karakterize eden eşitlikler ilgili resim noktalarının (x,y) bulunması için birleştirilebilir. Fotometrik stereo 'nun bu ikinci kullanımı "bin-of-parts" diye adlandırılan endüstriyel problem için uygundur. Otomatik bir tutucu objeyi tutacak şekilde, bir masada veya konveyördeki bilinen bir objenin yerinin ve yönünün saptanması için hedef obje noktalarının bir resimdeki yeri genelde yeterlidir.

Oldukça kullanışlı özel durum, yüzey normaleri gözlemciye doğru olan obje noktaları ile ilgilidir. Bunlar gradyant değeri $p = 0$ ve $q = 0$ olan obje noktalarıdır. Bu tip noktalar aydınlanma yönünün bakış doğrultusu etrafında döndürülmesi durumunda aydınlanma değeri sabit noktalar kümesi oluştururlar. Direk gözlemciye bakan yüzey normaline sahip obje noktaları yansıtma haritası $R(p, q)$ 'yu açık olarak tanımlanlamadan bulunabilirler. Faz açısı f sabit kalmak şartı ile aydınlatma yönü değiştirildiğinde $R(0,0)$ değişmemektedir.

Fotometrik stereo uygulamaları liner ve non-liner durumlar için şimdi örneklerle incelenecektir. Yarıçapı R olan ve merkezi obje uzayı orjinine yerleştirilmiş bir küre düşünelim. Şekil 3.2 deki gözlemci geometrisine karşılık gelen obje yüzeyinin açık ifadesi şöyle verilmektedir

$$z = f(x, y) = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}. \quad (5.1)$$

Gradyant koordinatları p ve q , (5.1) numaralı eşitliğin sırasıyla x ve y 'ye göre türevinin alınması ile elde edilir.

$$p = -\frac{x}{z} \quad \text{ve} \quad q = -\frac{y}{z}$$

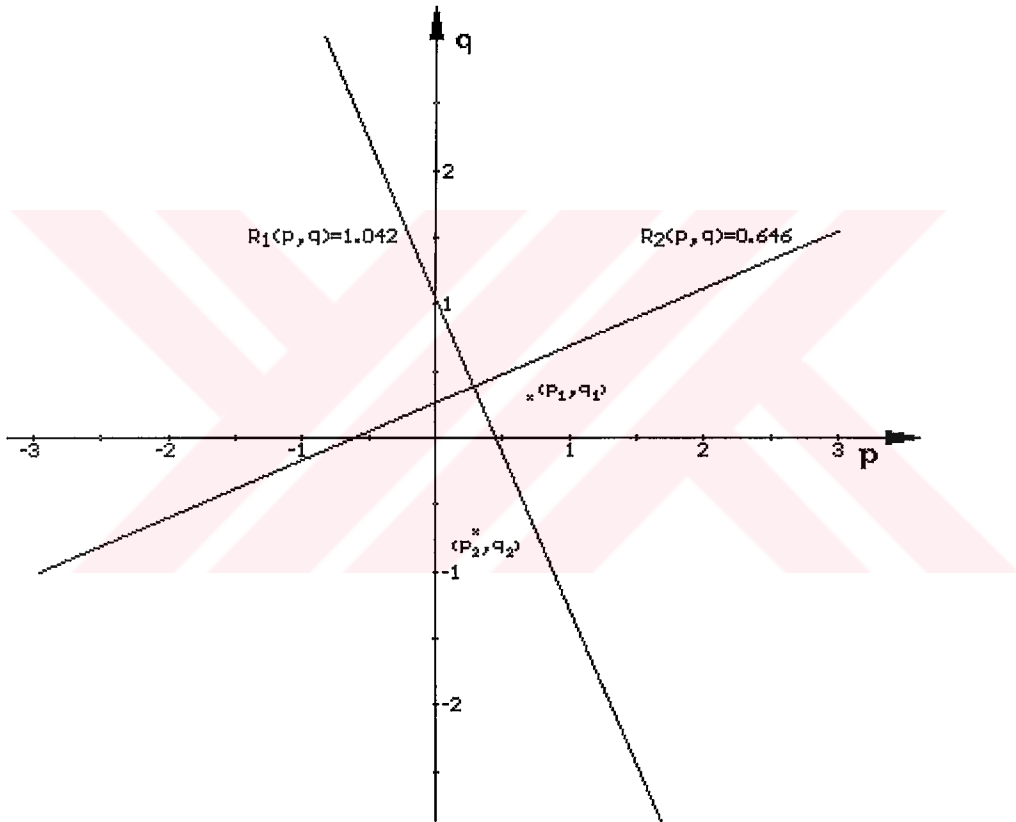
Kürenin, gradyant noktası (p_s, q_s) de bulunan uzak tek bir noktasal ışık kaynağından aydınlatıldığını farzedelim. Bu durumda oluşturulan resim

$$E(x, y) = \begin{cases} \max(0, R(-x/z, -y/z)) & x^2 - y^2 \leq R^2 \\ 0 & \text{diğerleri} \end{cases} \quad (5.2)$$

Burda zeminin siyah olduğu varsayılmaktadır. Aşağıdaki örneklerde $R = 40$ ve $\rho = 1$ alınmıştır.

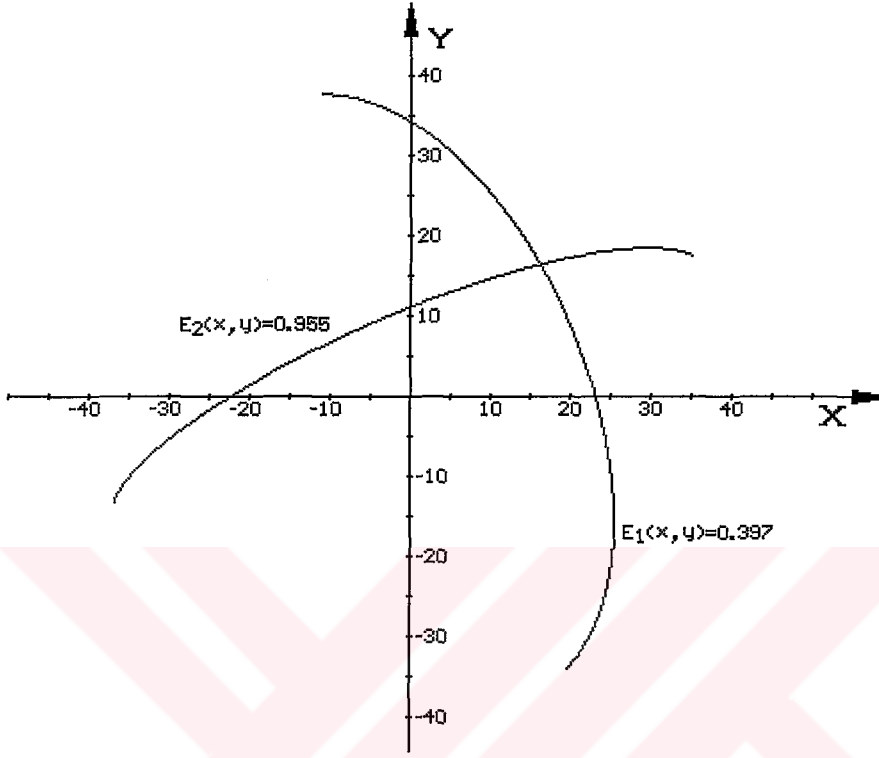
5.1. Liner Resim Aydınlanma Eşitliği.

Resimleri ışık kaynağının yerini değiştirerek elde edelim ve iki farklı ışık kaynağı yeri düşünelim. Bunlardan ilkinin yeri Şekil 3.5 'te olduğu gibi $p_s = 0.7$ ve $q_s = 0.3$ olsun. İkinci ışık kaynağının yeri bu ilk ışık kaynağı yerinin bakış yönü etrafında $+90^\circ$ döndürülmüş hali olsun. Bu durumda $p_s = 0.3$, $q_s = -0.7$ olacaktır. Yansıtma haritalarımız, (3.5) numaralı eşitlik ile verilen $R_b(p, q)$ şeklinde olsun ve $R_1(p, q)$ ve $R_2(p, q)$ şeklinde gösterelim. Her üç durumda faz açısı f aynıdır. (5.2) numaralı eşitlik ile elde edilen resimler sırasıyla $E_1(x, y)$ ve $E_2(x, y)$ olsun.



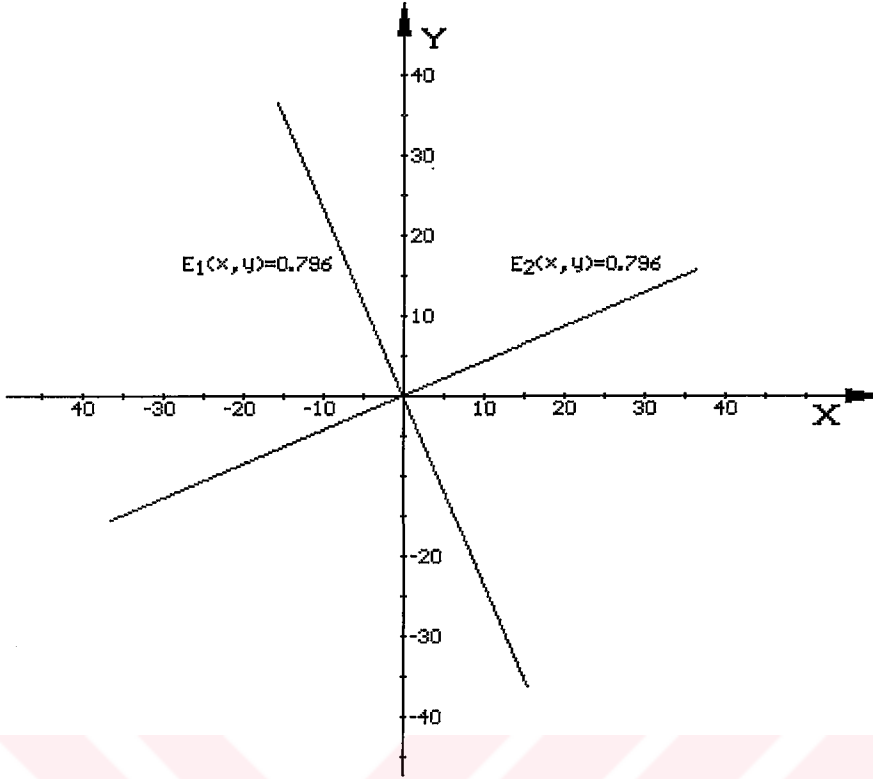
Şekil 5.1 : Verilen bir (x, y) resim noktasındaki yüzey yönünü (p, q) 'nun bulunması. Farklı resimlerdeki (x, y) noktasına ait aydınlanma değerlerine karşılık gelen yansıtma haritası konturları kesiktirilmştir. $E_1(x, y) = 1.042$ ve $E_2(x, y) = 0.646$.

İlk olarak resimlerdeki $x = -10, y = -14$ noktasını inceleyelim. Burda $E_1(x, y) = 1.042$ ve $E_2(x, y) = 0.646$ dır. Şekil 5.1 $R_1(p, q) = 1.042$ ve $R_2(p, q) = 0.646$ yansıtma haritası konturlarını göstermektedir. Bu iki konturun kesiştiği $p = 0.277, q = -0.388$ noktası, resimlerdeki $x = -10, y = -14$ noktasına karşılık gelen gradyant değeridir.



Şekil 5.2 : Verilen bir (p, q) yüzey yönüne sahip (x, y) resim noktalarının bulunması. (p, q) noktasında iki farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen iki resim aydınlatma konturu kesiştirilmektedir. $R_1(p, q) = 0.397$ ve $R_2(p, q) = 0.955$.

İkinci olarak $p = -0.5, q = -0.5$ gradyant noktasını inceleyelim. Burda $R_1(p, q) = 0.397$ ve $R_2(p, q) = 0.955$ tir. Şekil 5.2 resim aydınlatma konturları $E_1(x, y) = 0.397$ ve $E_2(x, y) = 0.955$ 'i göstermektedir. Konturların kesiştiği $x = 16.34, y = 16.34$ noktası, gradyant değeri $p = -0.5, q = -0.5$ olan obje noktalarına karşı gelmektedir.

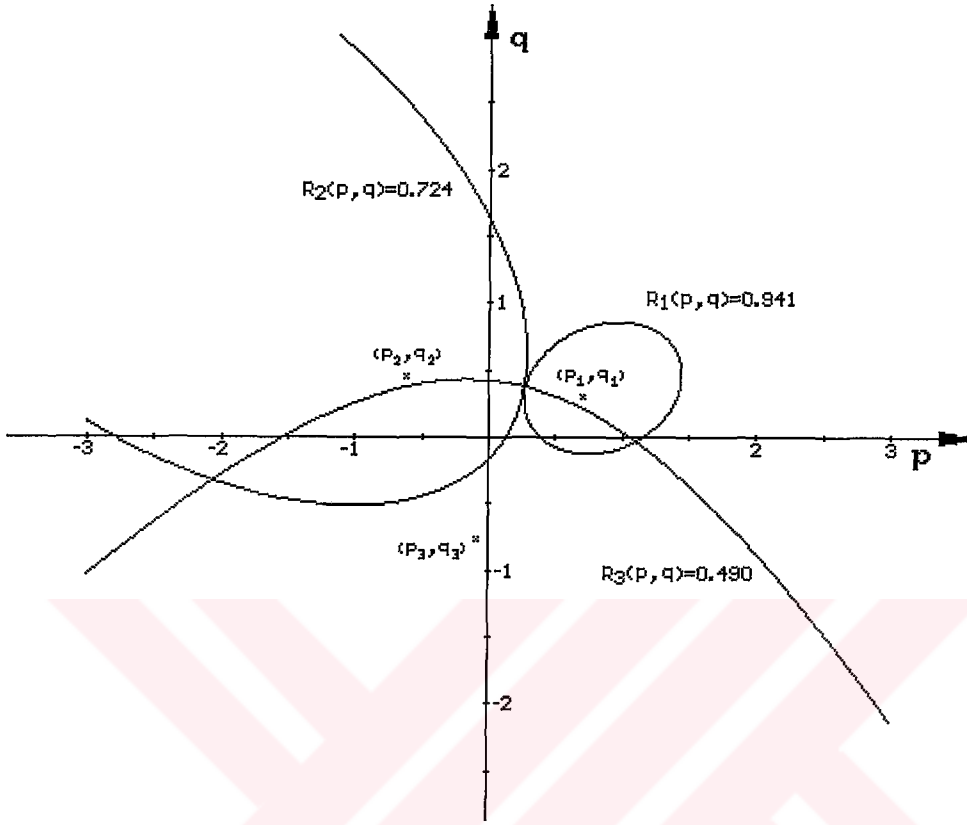


Şekil 5.3 : Yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan (x, y) resim noktalarının bulunması. $(0, 0)$ noktasında iki farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen iki resim aydınlatma konturu kesiştirilmektedir. Faz açısı f sabit kalmak şartı ile aydınlatma yönü değiştirildiğinde $(0,0)$ daki yansıtma haritası değerinin değişmediğine dikkat ediniz. $R_1(p, q) = R_2(p, q) = 0.796$.

Son olarak Şekil 5.2 'deki örneğin devamı olarak Şekil 5.3 'ü inceleyelim. Farklı olarak şimdi bu durumda $p = 0, q = 0$ 'dır. Bu durumda $R_1(p, q) = R_2(p, q) = 0.796$ 'dır. Yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan obje noktaları aynı sınıftan noktalardır ve bunların resim aydınlanmaları, ışık kaynağının gözlemci doğrultusu etrafında döndürülmesi durumunda değişmemektedir. Bu iki konturun kesiştiği $x = 0, y = 0$ noktası yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan bir obje noktasıdır.

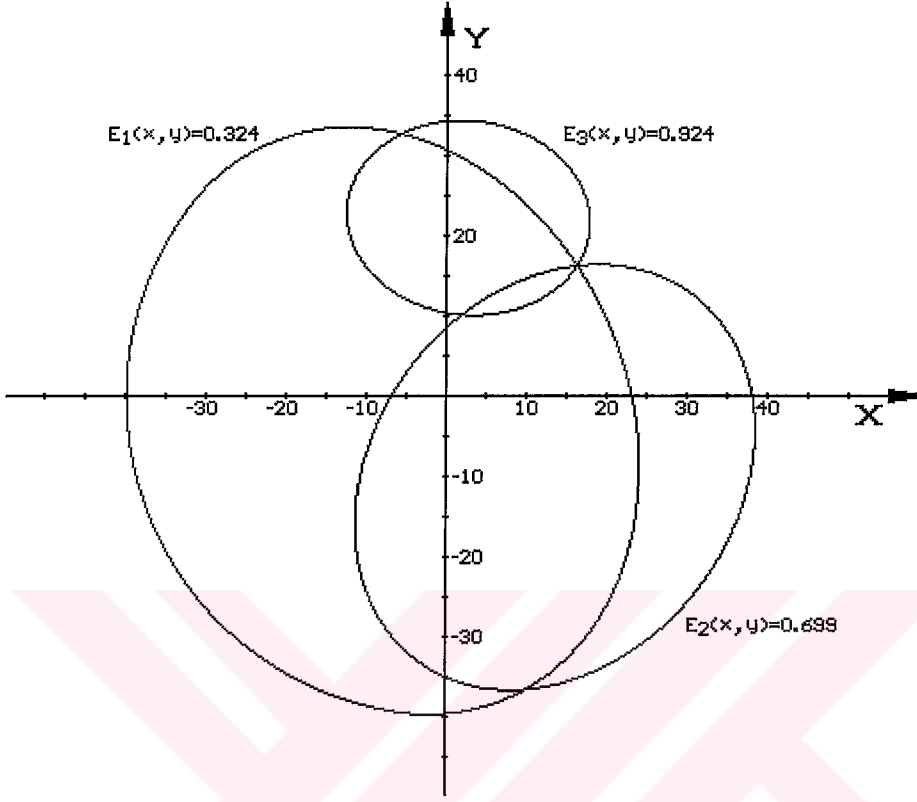
5.2. Non-Liner Resim Aydınlanma Eşitliği.

Resimleri ışık kaynağının yerini değiştirerek elde edelim ve üç farklı ışık kaynağı yeri düşünelim. Bunlardan ilkinin yeri Şekil 3.4 'de olduğu gibi $p_s = 0.7$ ve $q_s = 0.3$ olsun. İkinci ve üçüncü ışık kaynaklarının yerleri bu ilk ışık kaynağı yerinin bakış yönü etrafında sırasıyla -120° ve $+120^\circ$ döndürülmüş halleri olsun. Bu durumda $p_s = -0.610, q_s = 0.456$, ve $p_s = -0.090, q_s = -0.756$ olacaktır. Yansıtma haritalarımız, (3.4) numaralı eşitlik ile verilen $R_a(p, q)$ şeklinde olsun ve Üç yansıtma haritamızı $R_1(p, q), R_2(p, q)$ ve $R_3(p, q)$ şeklinde gösterelim. Her üç durumda faz açısı f aynıdır. (5.2) numaralı eşitlik ile elde edilen resimler ise sırasıyla $E_1(x, y), E_2(x, y)$ ve $E_3(x, y)$ olsun.



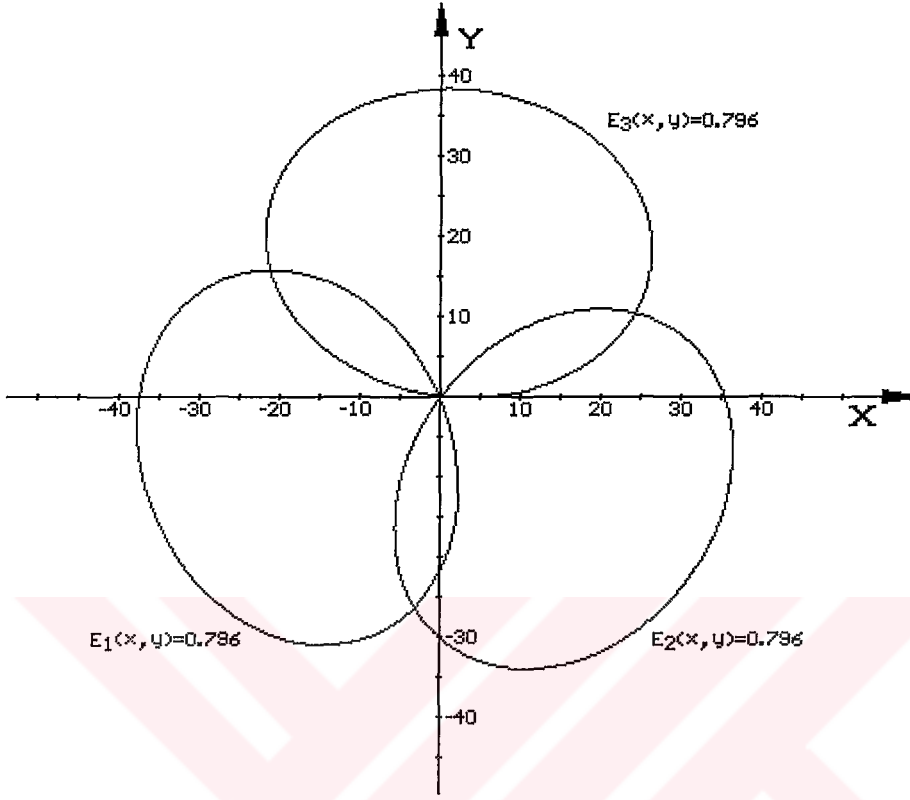
Şekil 5.4 : Verilen bir (x, y) resim noktasındaki yüzey yönünü (p, q) 'nun bulunması. Farklı resimlerdeki (x, y) noktasına ait aydınlanma değerlerine karşılık gelen yansıtma haritası konturları kesleştirilmiştir. $E_1(x, y) = 0.941$, $E_2(x, y) = 0.724$ ve $E_3(x, y) = 0.490$.

İlk olarak resimlerdeki $x = -10$, $y = -14$ noktasını inceleyelim. Burda $E_1(x, y) = 0.941$, $E_2(x, y) = 0.724$ ve $E_3(x, y) = 0.490$ dir. Şekil 5.4 'te $R_1(p, q) = 0.941$, $R_2(p, q) = 0.724$ ve $R_3(p, q) = 0.490$ yansıtma haritası konturlarını göstermektedir. Bu üç konturun kesiştiği $p = 0.277$, $q = 0.388$ noktası, resimlerdeki $x = -10$, $y = -14$ noktasına karşılık gelen gradyant değeridir.



Şekil 5.5 : Verilen bir (p, q) yüzey yönüne sahip (x, y) resim noktalarının bulunması. (p, q) noktasında üç farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen üç resim aydınlatma konturu kesleştirilmektedir. $R_1(p, q) = 0.324$, $R_2(p, q) = 0.699$ ve $R_3(p, q) = 0.924$.

İkinci olarak $p = -0.5$, $q = -0.5$ gradyant noktasını inceleyelim. Burda $R_1(p, q) = 0.324$, $R_2(p, q) = 0.699$ ve $R_3(p, q) = 0.924$ tür. Şekil 5.5 resim aydınlatma konturları $E_1(x, y) = 0.324$, $E_2(x, y) = 0.699$ ve $E_3(x, y) = 0.924$ 'ü göstermektedir. Konturların kesiştiği $x = 16.34$, $y = 16.34$ noktası, gradyant değeri $p = -0.5$, $q = -0.5$ olan obje noktalarına karşı gelmektedir.

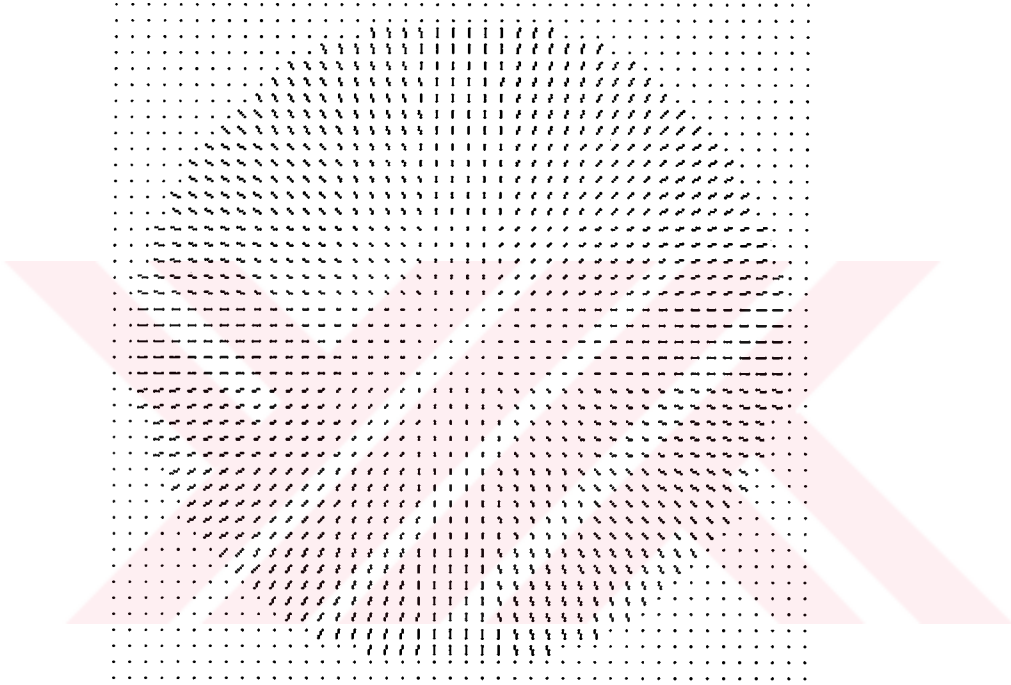


Şekil 5.6 : Yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan (x, y) resim noktalarının bulunması. $(0, 0)$ noktasında üç farklı yansıtma haritasından elde edilen değerlere karşılık gelen üç resim aydınlatma konturu kesiştirilmektedir. Faz açısı f sabit kalmak şartı ile aydınlatma yönü değiştirildiğinde $(0,0)$ daki yansıtma haritası değerinin değişmediğine dikkat ediniz. $R_1(p, q) = R_2(p, q) = R_3(p, q) = 0.796$.

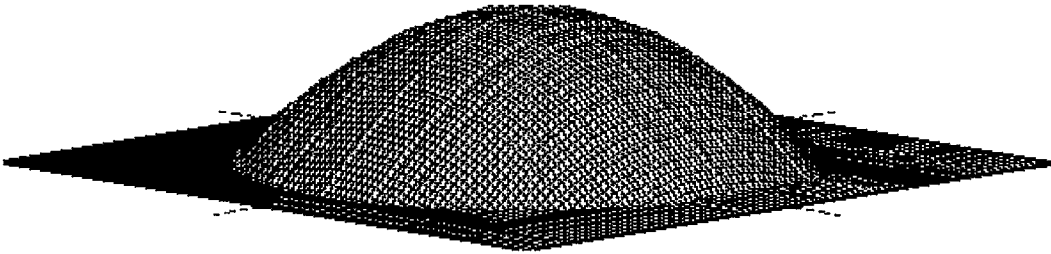
Son olarak Şekil 5.5 'teki örneğin devamı olarak Şekil 5.6 'yı inceleyelim. Farklı olarak şimdi bu durumda $p = 0, q = 0$ 'dır. Bu durumda $R_1(p, q) = R_2(p, q) = R_3(p, q) = 0.796$ 'dır. Yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan obje noktaları aynı sınıftan noktalardır ve bunların resim aydınlanmaları, ışık kaynağının gözlemci doğrultusu etrafında döndürülmesi durumunda değişmemektedir. Bu üç konturun kesiştiği $x = 0, y = 0$ noktası yüzey normali direk olarak gözlemciye bakan bir obje noktasıdır. Bu sonuç $R(p, q)$ 'nun şeklinin bilinmediği durumda da böyledir.

6. İĞNE DİAGRAMI VE DERİNLİK ELDE ETME

Fotometrik stereo tekniği bir resme uygulandığında yüzey yönü tahmini her resim hücresi için elde edilir. Sonuç iğne diagramı olarak adlandırılır. Her iğne ilgili resim hücresine ait normal vektörün bir yüzey parçası üzerine dikilmiş halini göstermektedir. Resimdeki iğnenin yönü yüzeydeki eğimin yönünü göstermektedir. Uzunluğu ise kısaltılmış uzunluğudur ve bu göz ile normal arasındaki açının sintüsü ile orantılıdır. İğne diagramı yüzey şeklini açıklar. Objeyi tanımak ve uzaydaki yönünü bulmak için kullanılabilir. Şekil 6.1 'de Bir küreye ait iğne diagramı gösterilmektedir.



Şekil 6.1 : Fotometrik stereo dahil bir çok makina görme metodu yüzey şekil bilgisini yüzey yönünün her resim noktası için verildiği iğne diagramı şeklinde oluşturur. Bir küreye ait yüzey şekil bilgisinin iğne diagramı şeklinde gösterimi.



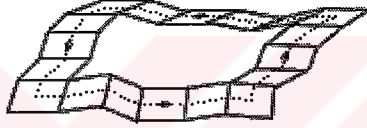
Şekil 6.2 : Bir küreye ait yüzey şekil bilgisinin derinlik haritası şeklinde gösterimi.

Bağızı durumlarda yüzey şeklini değişik bir yolla sunmak isteriz. Genelde istenen şey bir referans düzleme göre derinliği veren derinlik haritasıdır. Şekil 6.2. $z(x,y)$ 'nin x ve y 'ye göre kısmi türevleri olan p ve q verildiğinde $z(x,y)$ 'yi bir düzlemde keyfi eğriler boyunca integre ederek bulabiliriz.

$$z(x,y) = z(x_0,y_0) + \int_{(x_0,y_0)}^{(x,y)} (p dx + q dy) \quad (6.1)$$

Bu integrali ayrık olarak şu şekilde ifade edebiliriz

$$z[x,y] = \sum_{i=x_0}^x p [i,y] + \sum_{j=y_0}^y q [x,j] \quad (6.2)$$



Şekil 6.3 : Eğer yüzey yönü biliniyorsa, yüzeyin bir referans düzlemine göre yüksekliği eğriler boyunca integre edilerek bulunabilir. Kapalı bir eğri boyunca yükseklikteki toplam değişim sıfır olduğundan dolayı, Yüzey gradyanının kapalı bir eğri boyunca integrali sıfır olmalıdır.

Pratikte p ve q mükemmel olmıyan metotlarla gürültülü datadan elde edilmiştir. bundan dolayı yukarıdaki (6.1) numaralı integral seçilen yola bağlıdır. Gerçekte kapalı bir yol boyunca bir integral sıfırdan farklı olabilir. Şekil 6.3. Şimdi p ve q nun her ikisinde elimizde olduğundan gerçektende ihtiyacımız olandan fazla bilgiye sahibiz. Mükemmel olmıyarak tahmin edilmiş gradyant değerlerine en iyi uyan yüzeyi arıyoruz. Bu yüzeyin $z(x, y)$ olduğunu varsayarsak

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

Laplasyen tanımından

$$\nabla^2 z = p_x + q_y \quad (6.3)$$

istenen yüzeyin laplasyanın $p_x + q_y$ 'ye eşit olması gerekmektedir. Burda p_x ve q_y , bulunan p ve q gradyant değerlerinin sırasıyla x ve y 'ye göre kısmi türevleridir.

$$p_x = \frac{1}{2h} ((p_{[i+1, j+1]} - p_{[i, j+1]}) + (p_{[i+1, j]} - p_{[i, j]}))$$

$$q_y = \frac{1}{2h} ((q_{[i+1, j+1]} - q_{[i+1, j]}) + (q_{[i, j+1]} - q_{[i, j]}))$$

$$\nabla^2 z = \frac{1}{2h^2} ((z_{[i+1, j+1]} + z_{[i-1, j+1]} + z_{[i+1, j-1]} + z_{[i-1, j-1]}) - 4z_{[i, j]})$$

Burda h datalar arasındaki boşluktur. İlgili ayırık ifadeler iteratif şekli ortaya çıkarır

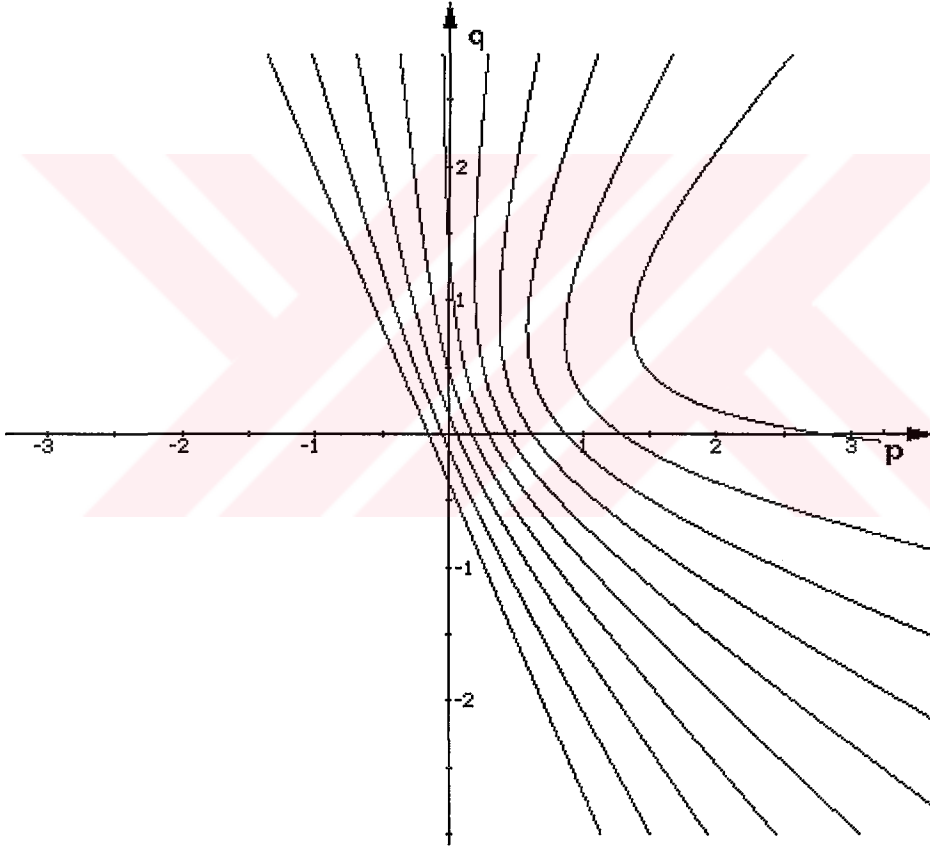
$$z_{[i, j]} = \frac{1}{4} (z_{[i+1, j+1]} + z_{[i-1, j+1]} + z_{[i+1, j-1]} + z_{[i-1, j-1]})$$

$$+ \frac{h}{4} ((p_{[i+1, j+1]} - p_{[i, j+1]}) + (p_{[i+1, j]} - p_{[i, j]}) + (q_{[i+1, j+1]} - q_{[i+1, j]}) + (q_{[i, j+1]} - q_{[i, j]})) \quad (6.4)$$

burda z' in yeni değerleri eski değerlerinin ve gradyant değerlerinin kullanılmasıyla elde edilmektedir. (6.2) ile verilen basit toplamlar şeklindeki ifade $\{ z_{[i, j]} \}$ için iyi ilk değerler sağlayacaktır. Hiç şüphesiz bu, sonuca hızlı bir yaklaşım sağlayacaktır.

7. DOĞRULUĞUN İNCELENMESİ.

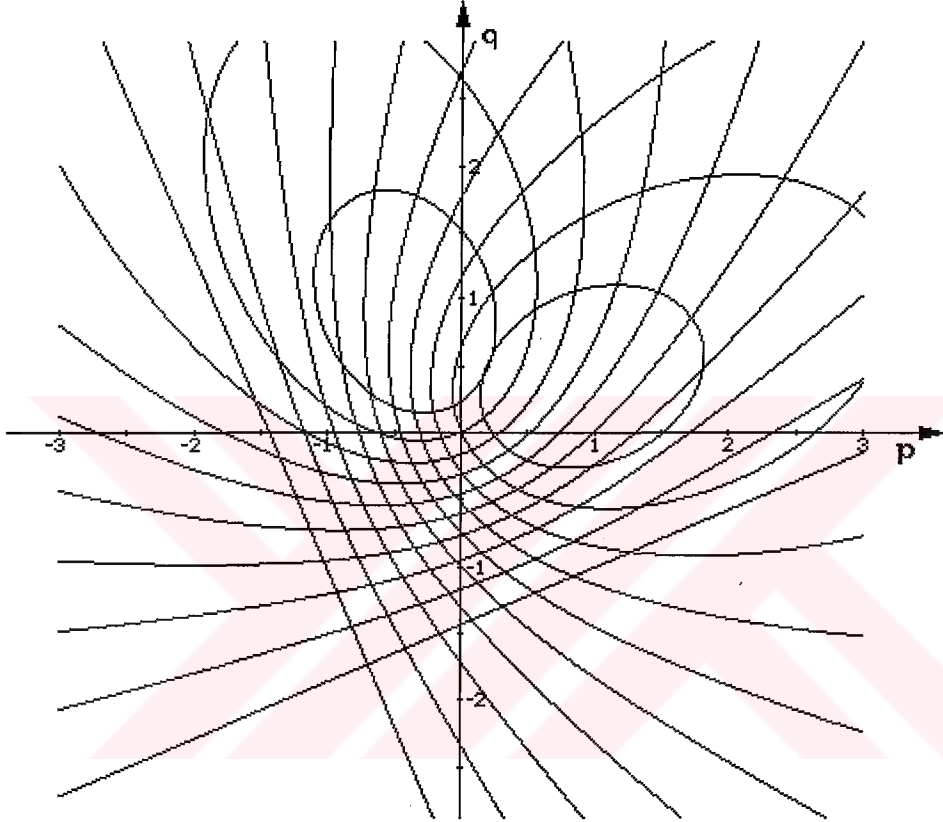
Yansıtma haritası konturlarının yoğunluğunun fazla olduğu ve konturların birbirlerini yaklaşık dik olarak kestikleri gradyant uzay bölgelerinde fotometrik stereo oldukça doğrudur. Yansıtma haritası konturlarının büyüklüğünü ve yönünü bir çok faktör etkiler. Bu faktörlerden biri yüzey malzemesinin yansıtma özellikleridir. Şekil 3.2 ve 3.3, Aynı aydınlanma koşulları altında bakılan iki ideal malzeme arasındaki farkı göstermektedir. Genelde yüzeyin parlaklığının artımı gradyant uzayının bir bölgesindeki konturların yoğunluğunu artırarak diğer bölgelere zarar vermektedir. Noktasal ışık kaynakları yerine farklı ışık kaynakları kullanılması yansıtma haritası konturlarının dağılımını ve yoğunluğunu değiştirmektedir. Resimleme sistemleri bu gerçeklerden faydalanacak ve farklı yansıtma özelliğine sahip yüzeylerle ilgilenecek şekilde düzenlenebilir. (Tagare et al, 1991)



Şekil 7.1 : $R_a(p,q)$ ile karakterize edilen yansıtma haritası şeklindeki $R(p, q)$ 'nun $p_s = 6.791$, $q_s = 2.910$, $\rho=1$ için çizilmiş 0.1 birim aralıklı yansıtma haritası konturları. Şekil 3.4 'ten farklı olarak faz açısı 45° arttırılmıştır. Faz açısının arttırılması gradyant uzayının bir bölümüne zarar vererek bazı bölgelerdeki yansıtma haritası konturlarının yoğunluğunu arttırmaktadır.

Verilen yüzey malzemesi için doğruluğu temel olarak saptayan faz açısı f 'nin seçimidir (Lee & Kuo). Büyük bir faz açısı gradyant uzayının büyük bir bölümünün karanlıkta kalmasına yol açarak,

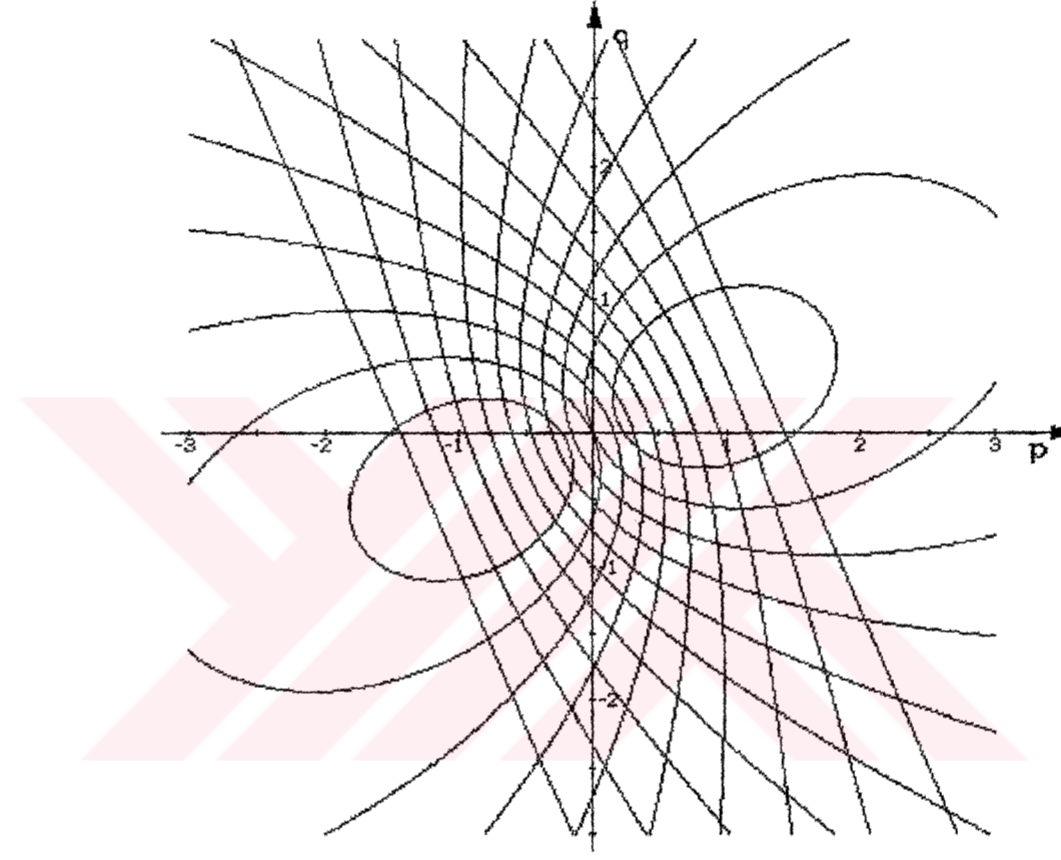
gradyant uzayının aydınlatılan bölümünde yansıtma haritası konturlarının yoğunluğunu artırır. Şekil 7.1 'de, Şekil 3.2 de $R_a(p,q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $p_s = 0.7$ $q_s = 0.3$ $\rho=1$ için çizilmiş yansıtma haritası konturlarının faz açısı 45° artırılarak çizilmiş hali gösterilmektedir. Burda Faz açısının artırılması gradyant uzayının 3. bölümü ve 2. ile 4. bölümlerin bir bölümlerinin karanlıkta kalmasına yol açarak, gradyant uzayının 1. bölümünde ve 2. ile 4. bölümlerin aydınlanan kısımlarında yansıtma haritası konturlarının yoğunluğunu arttırmaktadır.



Şekil 7.2 : $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma haritası şeklindeki $R_1(p, q)$ ve $R_2(p, q)$ 'nin sırasıyla $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $\rho=1$ ve $p_s = -0.3$, $q_s = 0.7$, $\rho=1$ için üst üste çizilmiş halleri. Her bir bölge, resim aydınlanma ölçümündeki hatanın yüzey gradyanı (p, q) hesaplanmasında nasıl bir hata oluşturacağını göstermektedir.

Işık kaynaklarının birbirlerine göre yerleri de incelenmelidir. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 ışık kaynaklarının yerleri ile ilgili bazı problemlerin gösterimidir. Her durumda yansıtmanın yukarıda karakterize edilen $R_a(p, q)$ şeklinde olduğu varsayılmaktadır. Şekil 7.2 de iki ışık kaynağı yönünün gözlemci doğrultusu etrafında 90° bir birinden farklı olması durumu incelenmektedir. Şekil 7.2, 0.1 birim aralıklı iki farklı yansıtma haritası konturlarının üst üste çizilmiş halini göstermektedir. Bunlar $p_s = 0.7$ $q_s = 0.3$ $\rho=1$ ve $R_a(p, q)$ yansıtma haritası şeklinde olan $R_1(p,q)$ ve $p_s = -0.3$ $q_s = 0.7$ $\rho=1$ ve $R_a(p, q)$ yansıtma haritası şeklinde olan $R_2(p,q)$ 'dur. Eş parlaklık konturlarının kesişimi gradyant uzayını farklı bölgelere ayırmaktadır. Bunların her biri verilecek her iki ölçüm değerine karşılık

bir dizi yüzey yöntü içerirler. Örneğin $E1(x, y)$, 0.4 ile 0.5 arasında bulunacak şekilde seçilir ve $E2(x, y)$, 0.5 ile 0.6 arasında bulunacak şekilde seçilirse bu hata bölgelerinin küçük olduğu gradyant uzayının üçüncü bölgesinde bir yere karşılık gelir. Diğer bir yandan $E1(x, y)$, 0.9 ile 1 arasında bulunacak şekilde seçilir ve $E2(x, y)$, 0.5 ile 0.6 arasında bulunacak şekilde seçilirse bu hata bölgelerinin büyük olduğu gradyant uzayının birinci bölgesinde bir yere karşılık gelir.



Şekil 7.3 : $Ra(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma haritası şeklindeki $R1(p, q)$ ve $R2(p, q)$ 'nin sırasıyla $ps = 0.7, qs = 0.3, \rho=1$ ve $ps = -0.3, qs = 0.7, \rho=1$ için üst üste çizilmiş halleri. Her bir bölge, resim aydınlanma ölçümündeki hatanın yüzey gradyanı (p, q) hesaplanmasında nasıl bir hata oluşturacağını göstermektedir.

Şekil 7.3, Şekil 7.2 deki örneğin devamıdır. Farklı olarak burda ikinci ışık kaynağı yeri gözlemci doğrultusu etrafında 180° döndürülmüştür. Bu durumda gradyant uzayının 2. ve 4. bölgelerinde hata bölgeleri daha küçüktür. İstenen toplam doğruluğu elde etmek için ikiden fazla ışık kaynağı kullanılabilir. Bir fikir gözlemci doğrultusu etrafında düzgünce dağıtılmış ve büyükçe bir faz açısına sahip dört farklı yön seçilmesidir (Woodham, 1980). Böyle bir durumda ilgililenen noktaların bir çoğu en az üç ışık kaynağı tarafından aydınlatılmaktadır ve hata bölgelerini küçültmek için konturlar birbirlerini yaklaşık olarak dik kesecek biçimde seçilebilirler.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.

Bu çalışmada yüzey yönlerinin sabit resimleme geometrisi altında, aydınlanma şartlarını değiştirerek resim aydınlanmalarından saptanabileceği gösterilmiştir. Bu amaçla resim aydınlanma eşitliklerinin liner olduğu ve olmadığı durumlar ile genel durumda, yüzey düzgünlüğü koşulu altında bir hata minimizasyonuna dayalı iteratif bir yöntem kullanılması ve bakma tablosu kullanılması incelenmiştir. Fotometrik stereo uygulamaları örneklerle açıklanmış ve doğruluğun gradyant uzayında yansıtma haritası konturlarının yoğunluğu ile ilişkili olduğu gösterilmiştir.

Bahsedilen tüm yöntemler denenerek sonuçların oldukça iyi olduğu gözlenmiştir. Şekil 8.1'de Resim aydınlanma eşitliklerinin liner olduğu durumda, $R_b(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$ ve $p_s = -0.3$, $q_s = 0.7$ olan giriş resimleri gösterilmektedir. Şekil 8.2 elde edilen yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimidir. Şekil 8.3 elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimidir.

Şekil 8.4 'te Resim aydınlanma eşitliklerinin non-linear olduğu durumda, $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $p_s = -0.610$, $q_s = 0.456$ ve $p_s = -0.090$, $q_s = -0.756$ olan giriş resimleri gösterilmektedir. Şekil 8.5 elde edilen yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimidir.

Şekil 8.6 'da Resim aydınlanma eşitliklerinin non-linear olduğu durumda, $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $p_s = -0.610$, $q_s = 0.456$ ve $p_s = -0.090$, $q_s = -0.756$ olan giriş resimleri gösterilmektedir. Bu giriş resimlerini kullanarak yüzey düzgünlüğü koşulu altında bir hata minimizasyonuna dayalı iteratif yöntem ile elde edilmiş yüzey yönü değerleri Şekil 8.7 'de gösterilmektedir.

Şekil 8.8 'de Resim aydınlanma eşitliklerinin non-linear olduğu durumda, $R_a(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$, $p_s = -0.610$, $q_s = 0.456$ ve $p_s = -0.090$, $q_s = -0.756$ olan giriş resimleri gösterilmektedir. Bu giriş resimlerini için bakma tablosu kullanılarak elde edilmiş yüzey yönü değerleri Şekil 8.9 'da gösterilmektedir.

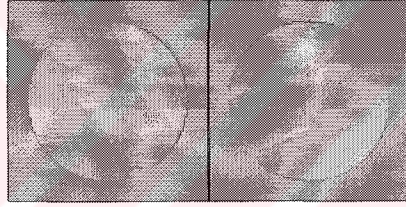
Şekil 8.10 ve Şekil 8.13 'de sırasıyla $p_s = 0.707$, $q_s = -0.707$, $p_s = -0.707$, $q_s = -0.707$ ve $p_s = -0.707$, $q_s = 0.707$ ile aydınlatılmış insan yüzü ve vazo resimleri gösterilmektedir. Bu resimler için elde edilen yüzey gradyant değerleri sırasıyla Şekil 8.11 ve Şekil 8.14 'te, derinlik haritaları ise Şekil 8.12 ve Şekil 8.15 'te gösterilmektedir.

Yüzey yönleri sabit resimleme geometrisi altında aydınlanma şartlarını değiştirerek resim aydınlanmalarından saptanabilmektedir. Yüzey yönünün saptanması için fotometrik metotlar, değişik bakış noktalarından alınmış resimlerdeki eş noktaların tanımlanmasına dayalı metotlara tamamlayıcı olduğu düşünülebilir. Bu amaçla aşağıda değişik bakış noktalarından alınmış resimler kullanan Stereo yöntemi ile Fotometrik stereo yöntemi karşılaştırılmaktadır.

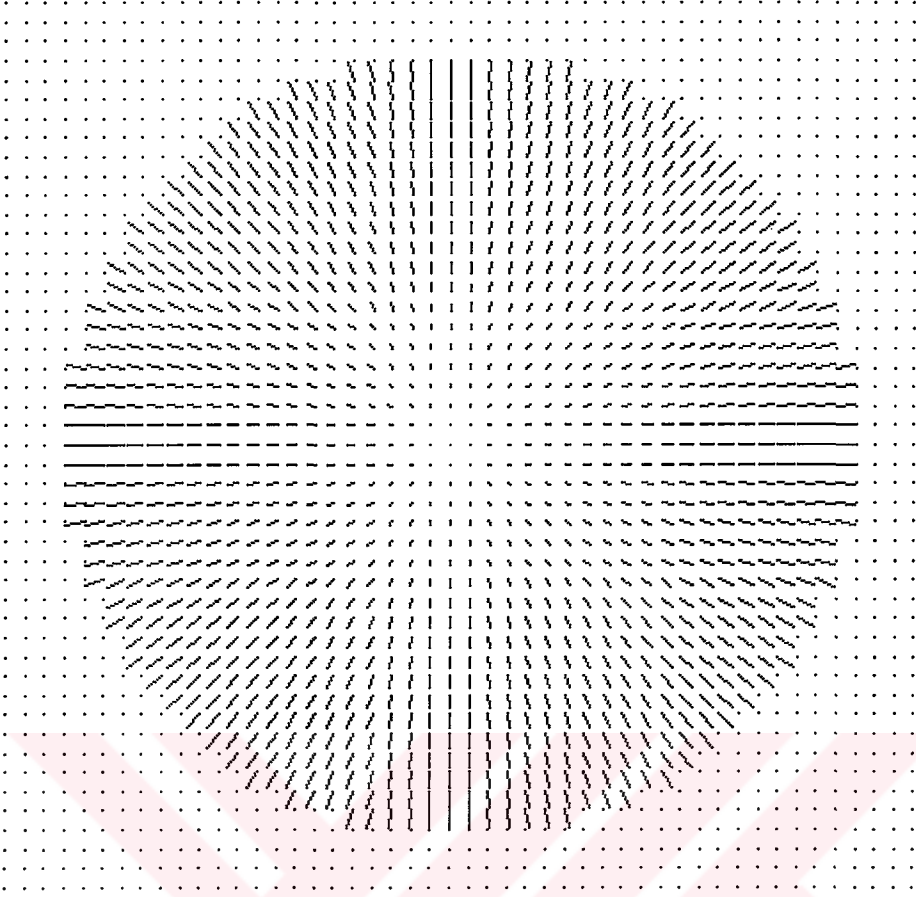
1. Stereo objeye olan mesafenin tahmininde kesin saptamalara imkan vermektedir. Yüzey gradyanı bulunacaksa Fotometrik stereo en iyisidir.
2. Stereo yüzey yönünde süreksizliklere sahip kaba yüzeylerde iyi çalışmaktadır. Fotometrik stereo az süreksizliğe sahip düzgün yüzeylerde en iyi şekilde çalışmaktadır.
3. Stereo yüzey yansıtmasında değişikliklere sahip resimli yüzeylerde iyi çalışmaktadır. Fotometrik stereo yüzey özellikleri üniform olan yüzeylere uygulandığında iyi çalışmaktadır.

Fotometrik stereo eşsiz avantajlara sahiptir

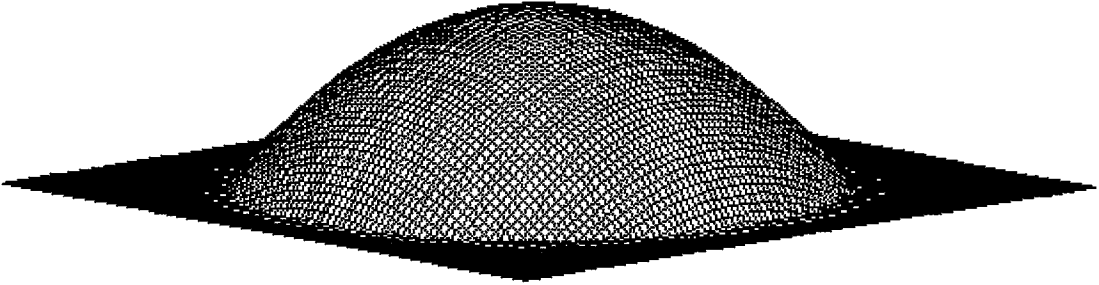
1. Resimler tek bir bakış noktasından elde edildiğinden iki resimdeki eş veya aynı noktaları tanımada hiç bir zorluk yoktur. Bu Stereo 'da de ana hesaplama işlemidir.
2. Uygun durumlar altında yüzey yansıtma faktörü , yüzey yönünün resim aydınlanması üzerindeki etkisi ortadan kaldırılabilir için bulunabilmektedir. Stereo böyle bir yeteneğe sahip değildir.
3. Bir obje şeklinin yüzey yönleri teriminden ifade edilmesi, mesafe yada bir referans düzleminden yükseklik teriminden bir çok tanımlama durumuna tercih edilebilir.



Şekil 8.1 : Resim aydınlanma eşitliklerinin liner olduğu durumda, $R_b(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $p_s = 0.7$, $q_s = 0.3$ ve $p_s = -0.3$, $q_s = 0.7$ için elde edilmiş giriş resimleri.



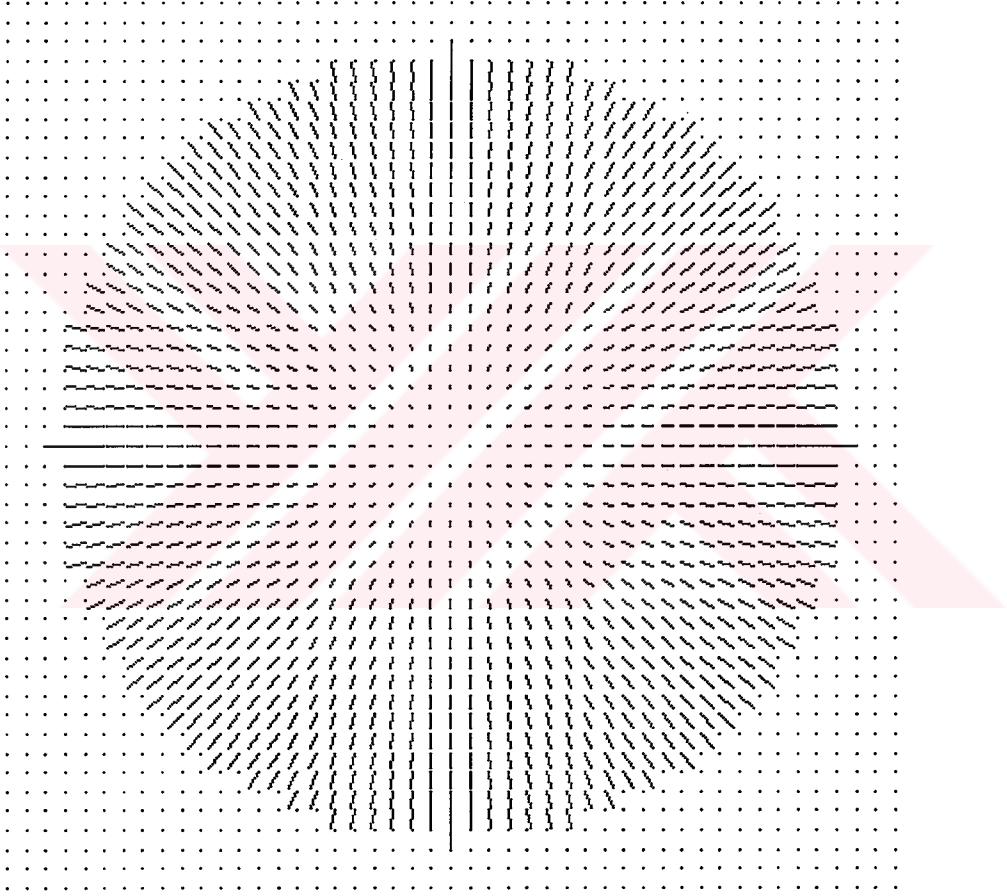
Şekil 8.2 : Şekil 8.1 'deki giriş resimleri için elde edilen yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi.



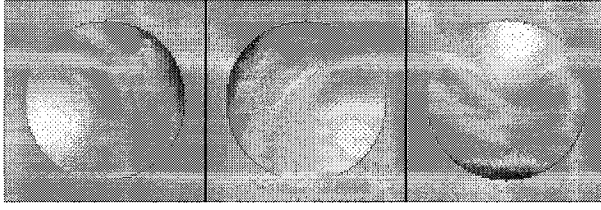
Şekil 8.3 : Elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğinin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimi.



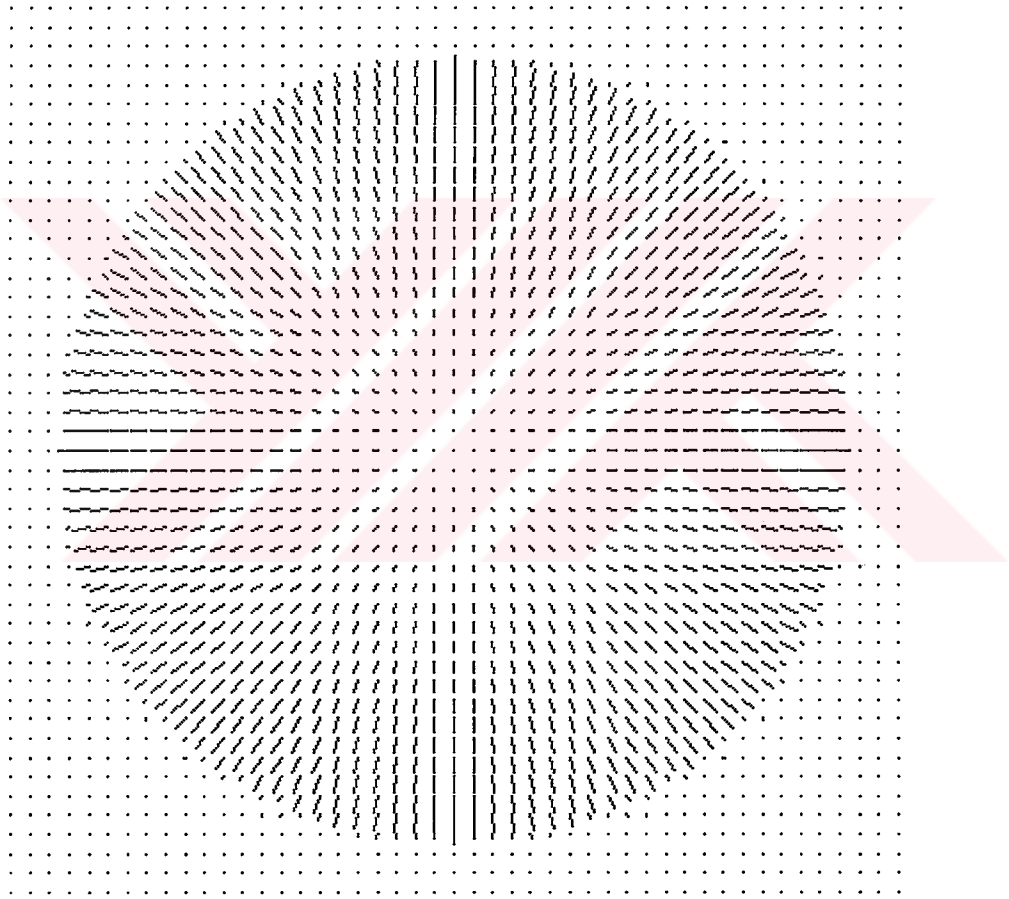
Şekil 8.4 : Resim aydınlanma eşitliklerinin non-linear olduğu durumda, $Ra(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $ps = 0.7, qs = 0.3, ps = -0.610, qs = 0.456$ ve $ps = -0.090, qs = -0.756$ için elde edilmiş giriş resimleri.



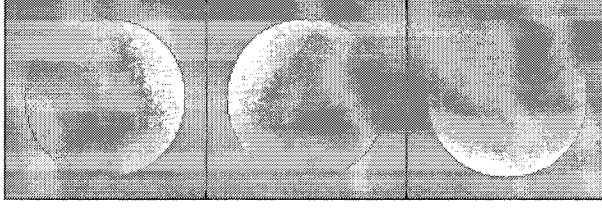
Şekil 8.5 : Şekil 8.4 'te ki giriş resimleri için elde edilen yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi.



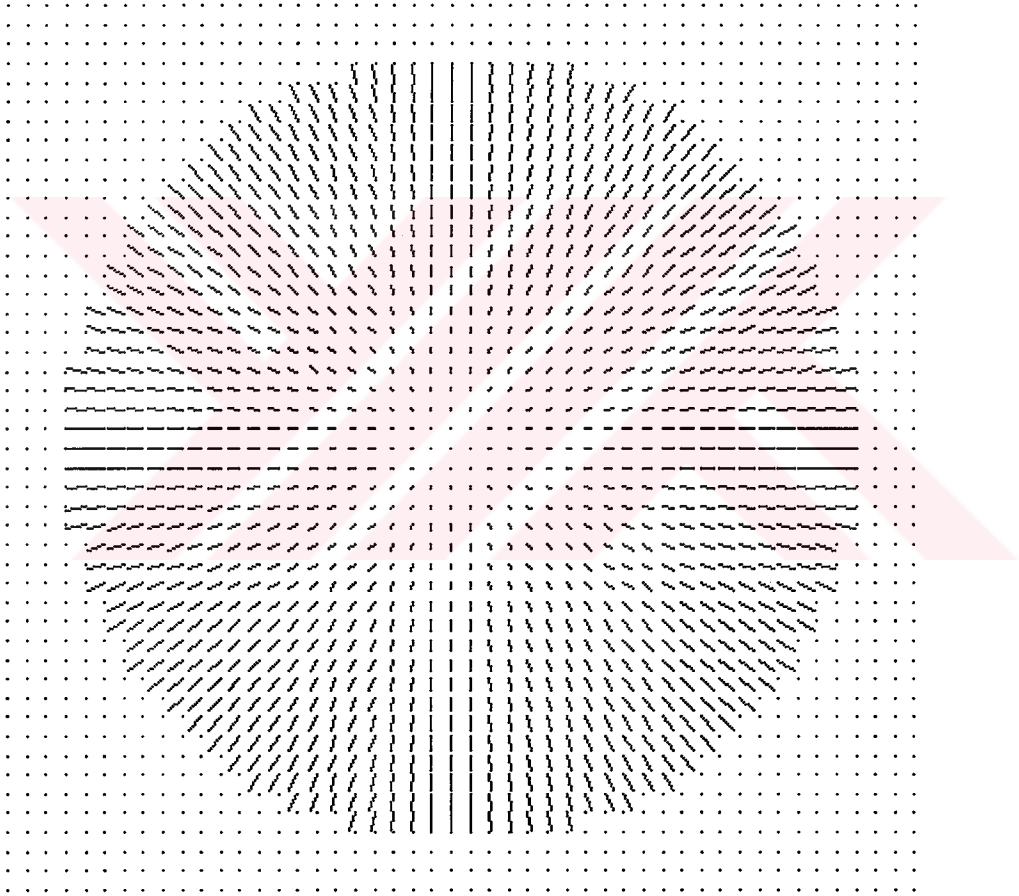
Şekil 8.6 : Resim aydınlanma eşitliklerinin non-linear olduğu durumda, $Ra(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $ps = 0.7, qs = 0.3, ps = -0.610, qs = 0.456$ ve $ps = -0.090, qs = -0.756$ için elde edilmiş giriş resimleri.



Şekil 8.7 : Şekil 8.6 'da ki giriş resimleri için yüzey düzgünlüğü koşulu altında bir hata minimizasyonuna dayalı iteratif yöntem ile elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi.



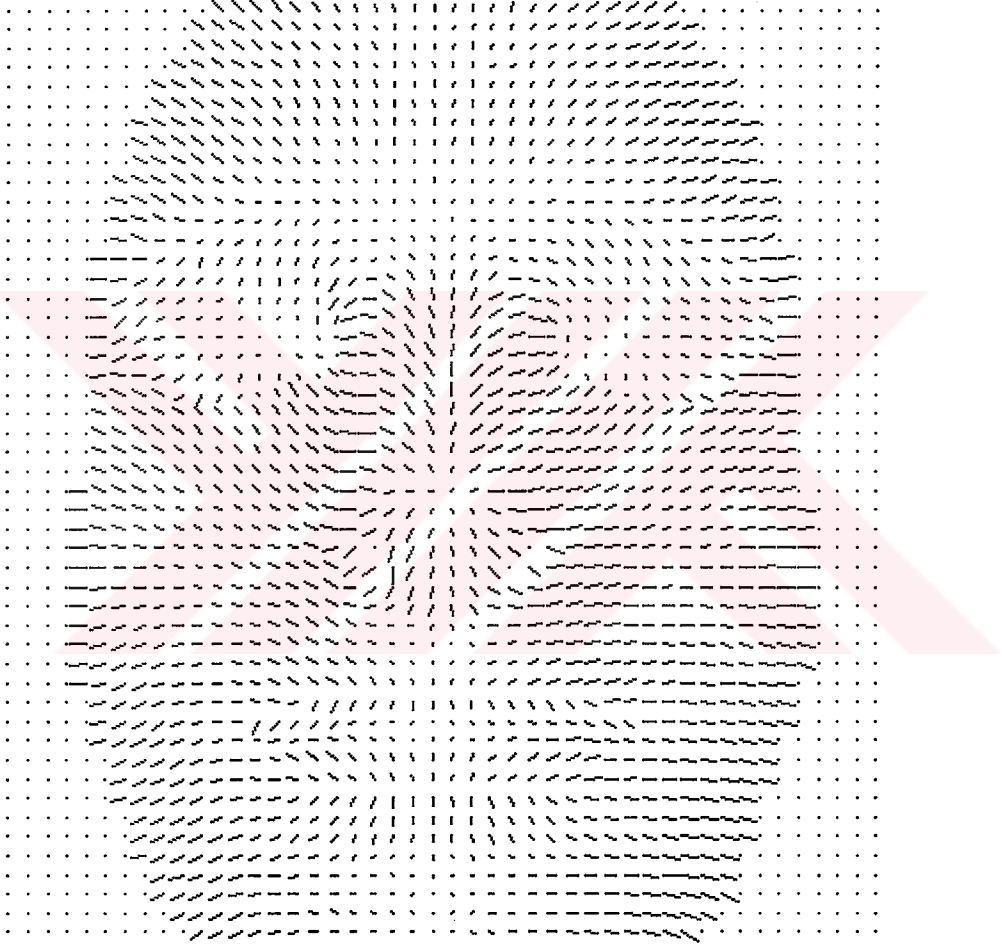
Şekil 8.8 : Resim aydınlanma eşitliklerinin non-linear olduğu durumda, $Ra(p, q)$ ile karakterize edilen yansıtma özelliğine sahip $R = 40$ olan bir kürenin sırasıyla ışık kaynağı yönü $ps = 0.7, qs = 0.3, ps = -0.610, qs = 0.456$ ve $ps = -0.090, qs = -0.756$ için 40 adet renk kullanılarak elde edilmiş giriş resimleri gösterilmektedir.



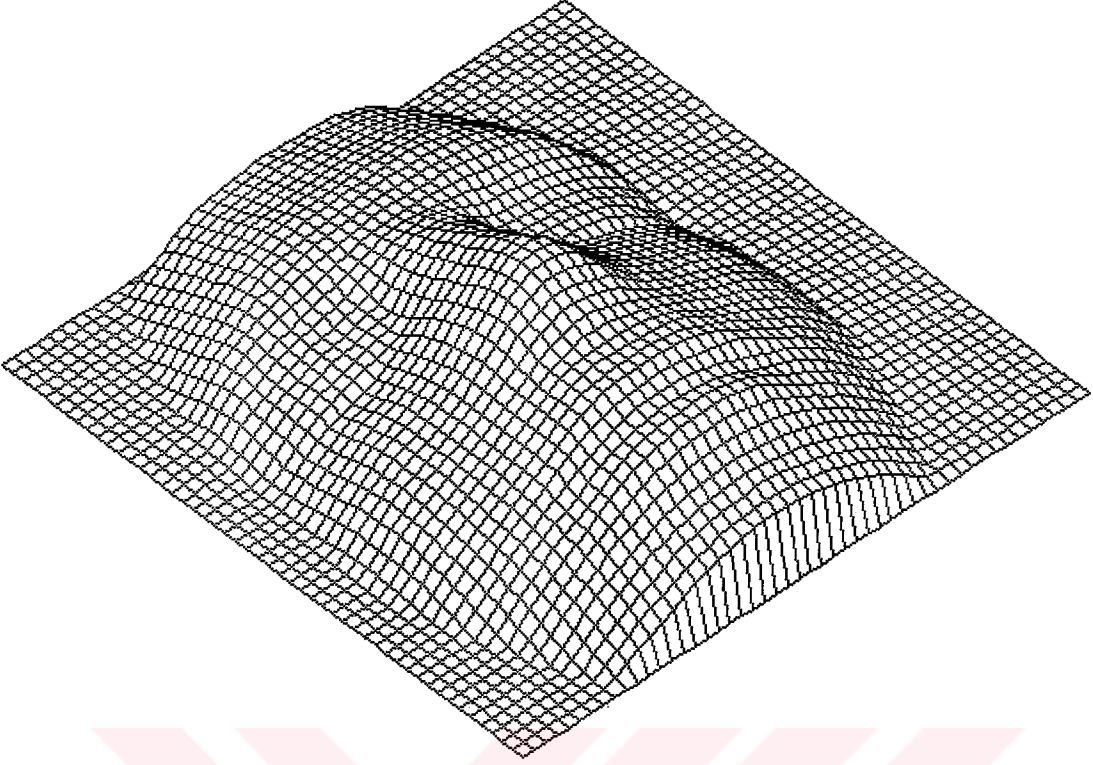
Şekil 8.9 : Bu giriş resimleri için bakma tablosu kullanılarak elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi.



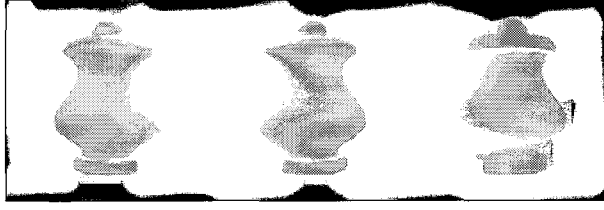
Şekil 8.10 : Sırasıyla $ps = 0.707$, $qs = -0.707$, $ps = -0.707$, $qs = -0.707$ ve $ps = -0.707$, $qs = 0.707$ ile aydınlatılmış insan yüzü resimleri.



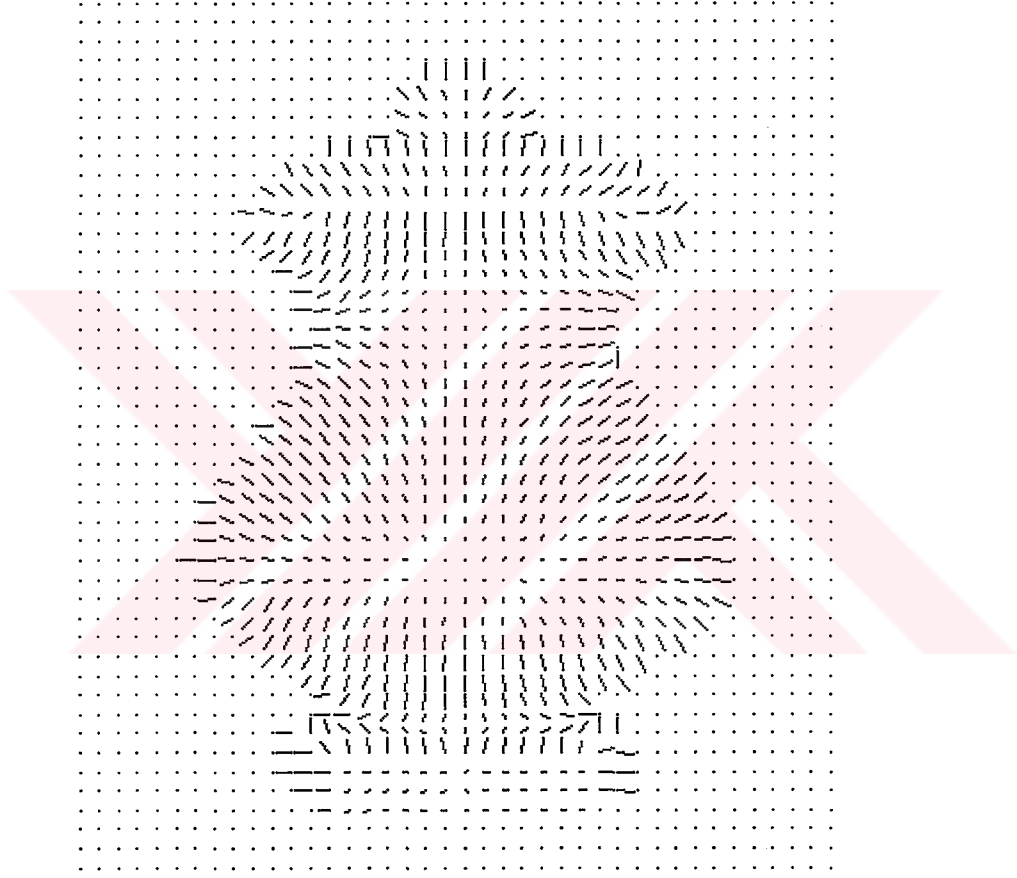
Şekil 8.11 : İnsan yüzü resimleri için elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi.



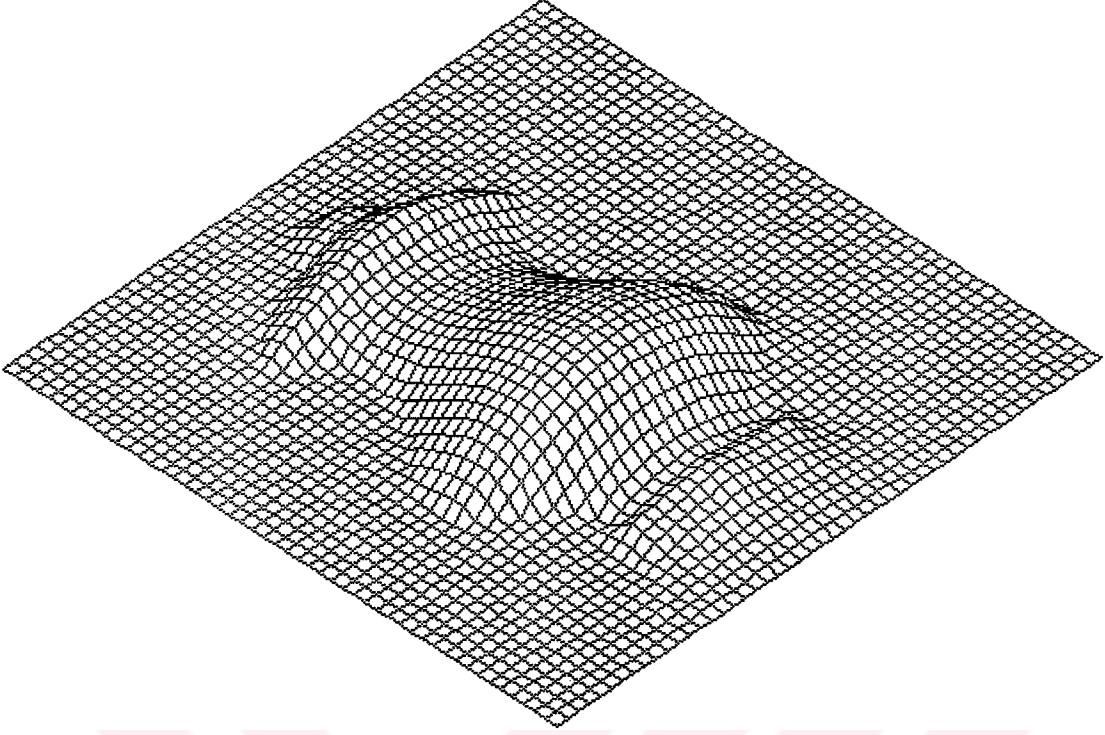
Şekil 8.12 : Elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğinin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimi.



Şekil 8.13 : Sırasıyla $ps = 0.707$, $qs = -0.707$, $ps = -0.707$, $qs = -0.707$ ve $ps = -0.707$, $qs = 0.707$ ile aydınlatılmış vazo resimleri.



Şekil 8.14 : Vazo resimleri için elde edilmiş yüzey yönü değerlerinin iğne diagramı şeklindeki gösterimi.



Şekil 8.15 : Elde edilen yüzey şeklinin bir referans düzlemine göre yüksekliğinin verildiği derinlik haritası şeklindeki gösterimi.

KAYNAKLAR :

- 1- Choe, Y. & Kashyap, R.L., 1991. 3-D Shape from a Shaded and Textural Surface Image, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 9, September: 907 - 919
- 2- Gençata, A. & Gökmen, M., Zar ve Levha Modellerinden Oluşan Karma Model Yardımıyla Yüzey Kurma ve Ayırıt Saptama, Bilgisayar Bilimleri Anabilimdalı Elektrik-Elektronik Fakültesi İ.T.Ü.
- 3- Horn B.K.P., 1986. Robot Vision, MIT Press.
- 4- Horn B.K.P & Brooks M.J., 1989, Shape From Shading, M.I.T Press
- 5- Ikeuchi, K. & Sato, K., 1991, *Determining Reflectance Properties of an Object Using Range and Brightness Images*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No.11, November: 1139 - 1153
- 6- Lee, K.M & Kuo, C.C.J., Shape Reconstruction From Photometric Stereo, Department of Electrical Engineering-Systems, Universty of Southern California.
- 7- Nayar, S.K. & Ikeuchi, K. & Kanade, T., 1990, *Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 4, August: 418 - 423
- 8- Nayar, S.K. & Ikeuchi, K. & Kanade, T., 1991, *Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, July: 611 - 633
- 9- Tagare, H.D. & deFigueiredo, R.J.P., 1991, *A Theory of Photometric Stereo for a Class of Diffuse Non- Lambertian Surface*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 2, February: 133 - 151
- 10- Tsai, P.S. & Shah, M., *A Fast Shape From Shading*, Department of Computer Science , Universty of Central Florida Orlando, FL32816
- 11- Woodham, R.J., 1980, *Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images*, Optical Engineering, Vol. 19, No. 1, pages , January/February: 139 - 144

12- Zheng, Q. & Chellappa, R., 1991, Estimation of Illuminant Direction, Albedo and Shape from Shading, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, July: 680 - 702



ÖZGEÇMİŞ :

| | |
|--------------|--|
| Doğum tarihi | 28 Ocak 1970 |
| Doğum yeri | İstanbul |
| 1984 - 1988 | Haydarpaşa Teknik Lisesi Elektrik Bölümü. |
| 1988 - 1992 | Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü. |
| 1992 - | Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Bilimleri Mühendisliği Anabilimdalı. |

