

Reconstructie in ruimte en tijd van een dynamisch wateroppervlak: een innovatieve, op foto's gebaseerde meettechniek

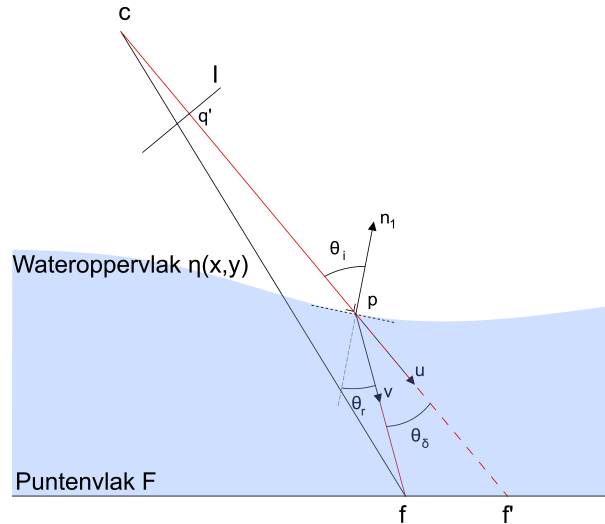
1 Inleiding

In het verleden zijn reeds verschillende technieken ontwikkeld om variërende wateroppervlakken in labo-omstandigheden te registreren. De meer recentere methodes zijn gebaseerd op optische technieken, waarbij één van de optische eigenschappen van water wordt gebruikt om de vorm en de positie van het wateroppervlak af te leiden. In deze thesis wordt een techniek op basis van refractie (lichtbreking) ontwikkeld om de waterschommelingen in een schaalmodel van een schutsluis te reconstrueren. De in deze masterproef ontwikkelde methode is gebaseerd op de methode ‘shape from refractive distortion’ van Morris¹ en zal in de eerste plaats bijdragen tot hydraulisch ontwerp van schutsluizen, die gebruikt worden een schip een hoogteverschil te laten overbruggen. Traditioneel worden de krachten tijdens de sluisvulling getoetst in een schaalmodel, hoewel men meer en meer beroep doet op numerieke modellen. Voor de opmaak en validatie van de numerieke modellen is er echter nood aan een nauwkeurige opmeting van waterspiegelschommelingen in een schaalmodel, waartoe de ontwikkelde methode zal bijdragen. De ontwikkelde methode kan echter toegepast worden voor elk hydrodynamisch fenomeen waarvan de waterhoogtes dienen gekend te zijn.

2 Methodologie

De ontwikkelde reconstructie-methodologie is gebaseerd op de refractie van licht aan het water-lucht grensooppervlak. Een regelmatig patroon van duidelijk herkenbare punten wordt op een effen oppervlak F onder het water geplaatst en het geprojecteerde en vervormde patroon op het oppervlak wordt door een camera vastgelegd. Ter hoogte van het wateroppervlak (punten \mathbf{p}) verandert de richting van de lichtstralen door lichtbreking (Figuur 1). Hierdoor kruisen de beeldstralen uit het cameracentrum \mathbf{c} het puntenvlak F in de punten \mathbf{f} in plaats van \mathbf{f}' (zonder breking).

¹N. J. W. Morris. Image-based water surface reconstruction with refractive stereo. PhD thesis, University of Toronto, 2004



Figuur 1: Geometrie van het reconstructieprobleem met als onbekenden de locatie van punt \mathbf{p} en de richting van de normaal \vec{n}_1

De richtingsverandering van de inkomende (\vec{u}) en de gebroken lichtstralen (\vec{v}) kan gebruikt worden om een geometrisch probleem in functie van de onbekende locatie van het oppervlaktepunt \mathbf{p} en de richting van de oppervlaktenormaal \vec{n}_1 te definiëren. Het probleem is echter onbepaald door slechts één vergelijking en twee onbekenden (\mathbf{p} , \vec{n}_1).

Indien een locatie voor het punt \mathbf{p} wordt aangenomen kan de richting van de inkomende (\vec{u}) en gebroken lichtstraal (\vec{v}) in \mathbf{p} berekend worden op basis van de gekende 3D locatie van de punten \mathbf{f} , \mathbf{c} en beeldpunten \mathbf{q}' . Deze twee vectoren (\vec{u} en \vec{v}) kunnen vervolgens gebruikt worden om de oppervlaktenormaal \vec{n}_1 te berekenen die deze richtingsverandering verklaart.

Op basis van de fysica van het bestudeerde fenomeen stel ik vervolgens een algemene oplossing (parametrisch model) op voor de vorm en de positie van het wateroppervlak. De coëfficiënten van de verschillende termen in het model worden hierbij geoptimaliseerd zodat het model overeenstemt met de berekende normalen \vec{n}_1 in de punten \mathbf{p} . Dit

maakt mijn aanpak in vergelijking met Morris, die voor elk punt een individuele waterhoogte optimaliseert, computationeel veel efficiënter en maakt het algoritme meer robuust t.o.v. meet- en optimalisatiefouten (bv. de lokalisatie van de beeldpunten \mathbf{q}').

De beschreven methodiek, die een set van beeldpunten \mathbf{q}' als input nodig heeft, kan toegepast worden voor elk foto uit een beeldenreeks om de variatie in de tijd te registreren. Hierbij worden in het eerste verwerkte beeld de beeldpunten \mathbf{q}' gelokaliseerd en vervolgens gevolgd over de volgende beelden met behulp van een optische stroomveldmethode. Door kennis over de vroegere locatie van de beeldpunten maakt dit het algoritme nog sneller.

Deze gehele methodologie werd ten slotte in een stand-alone, zelfgeschreven C++ programma gecomplementeerd. De verschillende stappen in de reconstructie werden in aparte modules ingebouwd, zodat ze elk afzonderlijk te verbeteren zijn of aan te passen naar de specifieke toepassing. De optimalisatie-instellingen, het gebruikte oppervlaktemodel en enkele parameters in de berekening kunnen op die manier gekozen worden in functie van de verwachte vorm en dynamiek van het onderzochte wateroppervlak.

3 Validatie en foutenanalyse

3.1 Experimentele validatie

Experimentele tests werden uitgevoerd in een kleinschalige tank met stilstaand water. De kleine vereenvoudiging van stilstaand water laat toe om de resultaten te valideren door vergelijking met metingen m.b.v. een peilnaald. Uit deze validatie bleek dat, indien een goede en uniforme verlichting van het vlak F kan worden gerealiseerd, de accuraatheid van de methode binnen de accuraatheid van de peilnaald (0.2 mm) gelegen is.

Daarnaast werd ook de invloed van enkele belangrijke factoren van de reconstructie onderzocht. De frequentieafhankelijke variatie van de brekingsindex van zichtbaar licht, het soort verlichting, het distortiemodel en de schatting van de extrinsieke cameraparameters hadden een verwaarloosbare invloed op het uiteindelijke resultaat voor de verschillende testgevallen. Belangrijke aspecten in de reconstructie bleken de hoek waarin de camera het wateroppervlak waarneemt, het aantal parameters/vrijheidsgraden in het oppervlaktemodel en het aantal camera's gebruikt als input voor de optimalisatie.

3.2 Numerieke foutenanalyse

De invloed van onnauwkeurige lokalisatie van de beeldpunten \mathbf{q}' werd gemodelleerd uitgaande van een Gauss-distributie voor de individuele fout (in pixels) in het beeldvlak. Deze localisatiefouten werden vervolgens gebruikt om de correcte pixelcoördinaten, corresponderend met een gekend oppervlak, aan te passen. Deze incorrecte beeldpunten werden tenslotte aangewend als input voor de optimalisatie en de resulterende set van oppervlakteparameters werd geëvalueerd.

Deze simulaties toonden o.a. aan dat kleine waterhoogtes, relatief t.o.v. de afstand tot de camera, moeilijk accuraat kunnen gereconstrueerd worden. Dit komt door de kleinere beweging van de beeldpunten voor een zelfde verplaatsing van het oppervlaktepunt \mathbf{p} . Voor grotere waterdieptes verbeterde het resultaat al bleek de robuustheid erg afhankelijk van het aantal coëfficiënten: modellen met veel vrijheidsgraden geven bij hoge waterhoogtes opnieuw minder goede resultaten.

4 Toepassing

Het ontwikkelde C++ programma werd ten slotte getest in een eerste experiment waarin het vulproces van een sluismodel werd geregistreerd. Dit resulteerde in een 3D beschrijving van het wateroppervlak in de tijd, waarin de inkomende, gereflecteerde en ten slotte uitdempende golven tijdens het vullen duidelijk te onderscheiden zijn. Hoewel de resultaten kwalitatief overeen kwamen met de theoretische verwachtingen, bleek de beperkte beeldensnelheid van de beschikbare camera's te laag om dynamische wateroppervlakken met dezelfde nauwkeurigheid als deze van Sectie 3.1 te beschrijven.

5 Samengevat

In deze masterproef werd een nieuwe methodologie voorgesteld om een dynamisch wateroppervlak in ruimte en tijd te beschrijven. De techniek combineert de vervorming door lichtbreking van een gekend patroon met een theoretisch oppervlaktemodel waarvan de parameters worden geoptimaliseerd om het wateroppervlak zo goed mogelijk te beschrijven. Het ontwikkelde programma is gevalideerd en de invloed van belangrijke factoren op het uiteindelijke resultaat is onderzocht met zowel experimentele tests als numerieke simulaties. Hieruit kunnen we besluiten dat vlakke wateroppervlakken zeer accuraat te reconstrueren zijn. Toekomstige aanpassingen om de performantie voor dynamische wateroppervlakken nog verder te verbeteren zijn gemakkelijk te implementeren door de modulaire opbouw van het zelfgeschreven C++ programma.